Conseil national de recherches Canada
National Research Council Canada

Institut de recherche en construction
Institute for Research in Construction

Regard 85 sur la science du bâtiment

Compte rendu

LUTTE CONTRE LE BRUIT DANS LES BÂTIMENTS

Canada

89-03247/

Cette publication fait partie d'une série de rapports publiés par l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches du Canada. Il est interdit de publier un résumé du présent document sans la permission écrite de l'Institut. Des extraits peuvent être cités pour les besoins d'une critique seulement.

On peut obtenir une liste des publications de l'Institut en écrivant à la Section des publications, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Ontario) Canada, K1A 0R6, téléphone (613) 993–2463.

ISSN 0835–6548
© Conseil national de recherches du Canada 1987

LUTTE CONTRE LE BRUIT DANS LES BÂTIMENTS

Compte rendu du Regard 85 sur la science du bâtiment

NRCC 27844F
Ottawa, décembre 1987
Compte rendu n° 12
Institut de recherche en construction

TABLE DES MATIÈRES

Préface 1

Principes de la lutte contre le bruit 3
par R.L. Quirouette et A.C.C. Warnock

Acoustique des locaux 13
par J.S. Bradley

Transmission du son à travers les éléments du bâtiment 25
par J.D. Quirt

L'acoustique en pratique 43
par A.C.C. Warnock

Questions et réponses 57

Préface

Le programme "Regard 85 sur la science du bâtiment" est le ving-cinquième de la série de séminaires–ateliers présentée par la Division des recherches en bâtiment depuis 1964. Le programme vise généralement à fournir une explication scientifique aux problèmes qui affectent la performance des bâtiments. Le programme s'adresse aux architectes, ingénieurs, propriétaires et promoteurs, éducateurs, constructeurs, fournisseurs et agents du bâtiment.

Le programme Regard 85 a été consacré à la lutte contre le bruit dans les bâtiments; il a été parrainé principalement par la Section d'acoustique de l'Institut de recherche en construction. Les auteurs se sont basés sur une vaste expérience sur le terrain et sur des travaux de laboratoire variés pour présenter une mise à jour des principes et des méthodes de lutte contre le bruit dans les bâtiments existants ou en construction.

Introduction

Le son est un phénomène envahissant et des facteurs tels que la forte densité des nouvelles constructions résidentielles et l'emploi d'équipement de haute puissance dans les constructions légères modernes conduisent à des niveaux de bruit plus élevés dans nos foyers, sur nos lieux de travail et, en général, partout dans nos villes. De fait, des études menées aux États-Unis montrent que le niveau de bruit des principales villes s'élève d'environ 1 décibel par an. Nous ne pouvons plus ignorer ce phénomène!

Le champ général de la lutte contre le bruit étant assez vaste, le programme Regard 85 a été limité à la lutte contre le bruit dans les bâtiments. Cependant, les principes de la lutte contre le bruit restent les mêmes quel que soit l'environnement considéré.

Un mauvais isolement acoustique peut facilement gâcher une agréable soirée au restaurant. Un niveau de bruit élevé sur le lieu de travail distrait et irrite, ce qui peut conduire à un plus fort absentéisme et à une perte de productivité. L'intimité acoustique est souvent insuffisante dans les édifices à bureaux. Les salles de conférence, pourtant destinées avant tout à la communication orale, sont souvent excessivement réverbérantes et bruyantes, et il est alors difficile de comprendre des paroles prononcées à quelques pas seulement. La plupart des écoles, des églises, des gymnases et des piscines déjà construits pourraient tirer avantage d'une correction acoustique qui améliorerait la qualité de leur environnement intérieur ainsi que leur rentabilité.

Une étude récente menée à Vancouver a montré qu'environ 40 % des locataires de plusieurs immeubles d'habitation étaient insatisfaits de l'intimité acoustique de leur foyer. C'était là le principal problème soulevé par les locataires et c'est une plainte courante dans un grand nombre de nouveaux appartements et condominiums.

Ailleurs, dans un grand hôtel en Angleterre, les concepteurs l'ont emporté sur les ingénieurs en acoustique. Afin d'économiser quelque 600 000 dollars, ils ont construit des chambres avec des fenêtres à simple vitrage et des châssis manoeuvrables pour la ventilation. Lorsque l'hôtel est entré en service, les bruits de la circulation automobile était si intenses dans les chambres à coucher que la plupart d'entre elles étaient inutilisables. Pour corriger la situation, il a fallu installer un double vitrage et un système de conditionnement d'air à un coût de 2,4 millions de dollars, sans compter les pertes de produits et les inconvénients pendant les réparations.

De telles erreurs sont inexcusables puisque nous possédons les connaissances pour concevoir et construire des environnements acoustiques de qualité.

Le programme Regard 85 est consacré à l'étude des principes de la lutte contre le bruit dans les bâtiments. Le premier exposé traite des aspects fondamentaux de l'acoustique. Viennent ensuite, dans le deuxième exposé, les critères et méthodes qui peuvent être utilisés pour lutter contre le bruit dans les locaux. Le troisième porte sur la réduction du bruit à travers les murs, les planchers, les fenêtres et les portes. Enfin, le dernier exposé est consacré à l'acoustique des bâtiments, plus particulièrement aux bruits émis par les machines et les installations de plomberie, ainsi qu'à l'épineux problème de la transmission latérale du bruit.

Itinéraire et statistiques

Les séminaires–ateliers du Regard 85 sur la science du bâtiment ont été tenus dans onze grandes villes canadiennes : Halifax, Saint-John (N.-B.), Québec,

Montréal, Ottawa, Toronto, Winnipeg, Regina, Calgary, Edmonton et Vancouver. Des séances additionnelles ont été présentées à Toronto et à Montréal. La présentation a été faite en français à Québec et à l'une des séances de Montréal.

Au total, 543 personnes ont assisté aux 13 séances présentées d'un bout à l'autre du Canada. De ce nombre, environ 33 % appartenaient au groupe des planificateurs, c'est-à-dire des architectes, planificateurs municipaux, concepteurs et dessinateurs; 17 % appartenaient au groupe technique; 13 % étaient des directeurs et administrateurs de projets représentant les propriétaires; 13 % étaient des fournisseurs de matériaux, 12 % appartenaient à des services d'inspection et 5 % étaient des ingénieurs-conseils. Les 7 % restants représentaient les chercheurs et les professeurs.

Quelques mots sur les auteurs

Les séances du Regard 85 sur la science du bâtiment ont été présentées en anglais et en français, ce qui a nécessité la participation de nombreux spécialistes. Les conférenciers et les animateurs étaient John Bradley, Dave Quirt, Rick Quirouette, Alf Warnock et Madeleine Rousseau, tous de l'Institut de recherche en construction. Les quatre premiers sont aussi les principaux auteurs des rapports écrits qui suivent.

Ateliers

Les après-midis étaient consacrés aux discussions. Ces ateliers donnaient l'occasion aux participants de discuter des sujets techniques présentés à la session du matin.

L'auditoire était divisé en deux groupes, chacun étant animé par deux des auteurs. Un ou deux conseillers locaux assistaient aussi à chaque atelier. Ces derniers duraient une heure et quart et, après une pause-café, les groupes alternaient pour participer à un second atelier avec les deux autres animateurs.

De nombreux points ont été examinés au cours des ateliers. Les animateurs ont recueilli un certain nombre de questions et réponses qui sont incluses en conclusion de ce compte rendu.

Remerciements

Le succès du programme Regard 85 sur la science du bâtiment repose en grande partie sur le matériel visuel utilisé pour bien communiquer les informations. Nous remercions la Section du graphisme de l'IRC pour la préparation des dessins et des photographies.

Nous remercions également Gail LeBlanc, Laurette Ernst et Madeleine Fleury du zèle infatiguable dont elles ont témoigné pour dactylographier les multiples versions des articles, pour préparer les documents d'inscription et pour le service de renseignements qu'elles ont assuré durant la préparation et la réalisation du programme.

Regard 85 sur la science du bâtiment a bénéficié du concours d'un grand nombre de personnes qui ont mis au point et préparé le matériel technique nécessaire. Il convient de remercier tout particulièrement M. Jacques Rousseau de la Société canadienne d'hypothèques et de logement et M. Dennis Watson de Tremco Limited. Un grand nombre de leurs suggestions sur le contenu technique et les règles de l'art ont été intégrées dans le programme.

Nous remercions aussi tout spécialement la vingtaine d'ingénieurs-conseils qui ont participé aux ateliers de l'après-midi. Une liste des ingénieurs-conseils présents est donnée à la fin de ce document.

Finalement, et surtout, nous tenons à vous remercier de l'intérêt que vous portez au transfert des connaissances dans le domaine de la science du bâtiment.

B.F. Stafford, administrateur du programme
R.L. Quirouette, coordonnateur du programme

Principes de la lutte contre le bruit

R.L. Quirouette et A.C.C. Warnock

Propriétés physiques du son

La présente section contient une brève présentation de certains des termes utilisés en acoustique du bâtiment et des méthodes d'essais servant à caractériser les ensembles et les matériaux. Une connaissance élémentaire de certains aspects fondamentaux de l'acoustique et des termes utilisés en acoustique du bâtiment suffit pour comprendre ce chapitre et les chapitres subséquents. Pour souligner la simplicité de la démarche, les auteurs s'en sont tenus à un nombre minimal d'équations.

Le son est produit par une perturbation de l'air qui donne naissance à une série d'ondes de pression oscillant autour de la pression atmosphérique normale, tout comme une pierre qui donne naissance à des ondulations en tombant dans l'eau. Cependant, contrairement aux ondulations, ces ondes de pression se propagent dans toutes les directions à partir de la source de bruit. Nos oreilles détectent des variations de pression et les convertissent en impulsions électriques qui sont transmises à notre cerveau, où elles sont interprétées comme un son.

Il existe de nombreuses sources sonores dans les bâtiments : voix, activités humaines, bruits extérieurs tels que la circulation routière, appareils de divertissement et machines. Toutes ces sources produisent de petites variations rapides de pression par rapport à la pression atmosphérique qui se propagent dans l'air sous forme d'ondes sonores.

En plus de se propager dans l'air, le son peut se propager dans les solides ou les liquides sous forme d'ondes vibratoires. Les expressions "son aérien" et "son solidien" sont utilisées suivant le milieu de propagation du son. Par exemple, le bruit d'un poste de radio peut être à l'origine un son aérien, pénétrer dans la structure du bâtiment et traverser une certaine distance sous forme de son solidien, et être rayonné de nouveau sous forme de son aérien à un autre endroit (figure 1). L'importance du bruit solidien deviendra plus évidente lorsque la transmission latérale sera examinée dans l'exposé intitulé *L'acoustique en pratique*.

La pression de l'air est généralement mesurée en Pascals (Pa). La pression atmosphérique est d'environ 100 kPa. La pression acoustique est une mesure de la fluctuation de la pression de l'air au-dessus et au-dessous de la pression atmosphérique normale lorsque les ondes sonores se propagent au-delà d'un auditeur. En général, plus les fluctuations sont grandes, plus le son est fort.

Les variations de pression d'une onde sonore donnée sont bien inférieures à la pression atmosphérique; la gamme de pressions acoustiques est cependant très vaste. Le seuil d'audibilité correspond à des fluctuations de pression de 20 microPascals; certaines personnes ont une acuité auditive supérieure à ce seuil et d'autre, inférieure. Le seuil de douleur de l'oreille correspond à des fluctuations de pression d'environ 20 Pa. Cette valeur équivaut à 1 million de fois la première. Ces nombres, difficiles à manier, sont convertis en nombres plus commodes à l'aide d'une échelle logarithmique, l'échelle des décibels. Il s'agit des niveaux de pression acoustique qui sont exprimés par un nombre suivi du symbole dB; les sonomètres convertissent les signaux électriques provenant d'un microphone en niveau de pression acoustique exprimé en dB. Le tableau 1 donne quelques niveaux de pression acoustique correspondant à diverses situations.

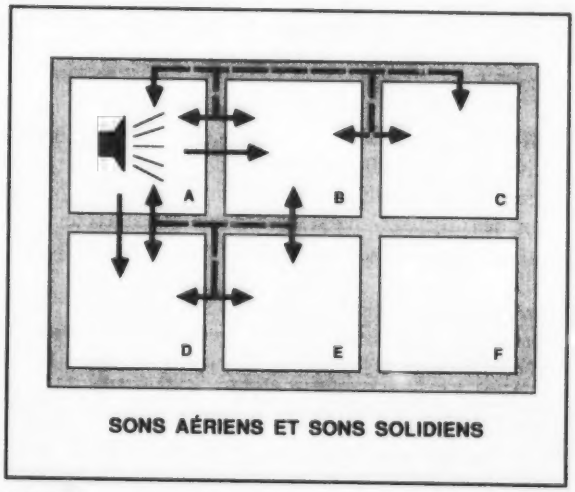

Figure 1

Tableau 1 Niveaux sonores typiques

	dB
Décollage d'un avion à réaction, tir d'artillerie, rivetage	120 ou plus
Orchestre de rock ou orchestre très bruyant	100 — 120
Camion sans silencieux, sifflet de police	80 — 100
Poste de radio ou de TV, réglage moyen	70 — 90
Voix humaine à 1 m	55 — 60
Bruit ambiant dans un bureau privé	35 — 40
Maison calme	25 — 35
Seuil d'audibilité	20

Les décibels traduisent plus facilement les impression de l'oreille humaine, qui réagit aussi logarithmiquement au son. La réaction de nos oreilles, c'est-à-dire notre perception de l'intensité du son, n'augmente pas de façon linéaire avec un accroissement de la pression acoustique. Par exemple, augmenter le niveau de pression acoustique de 10 dB équivaudrait à doubler l'intensité du son. En pratique, des variations d'environ 3 dB sont tout juste perceptibles.

Il importe de ne pas oublier que les décibels et autres valeurs acoustiques similaires ont des propriétés différentes des autres unités plus courantes. Par exemple, les niveaux de pression acoustique ne s'ajoutent pas comme des kilogrammes. La combinaison de deux bruits ayant des niveaux moyens de 60 dB ne donne pas un niveau de pression acoustique de 120 dB, mais de 63 dB.

L'addition d'un bruit de 70 dB dans une pièce où le niveau de pression acoustique est de 80 dB n'entraînera pas de différence mesurable dans le niveau global. Cependant, cela ne signifie pas qu'on peut introduire un grand nombre de sources secondaires dans un environnement sans augmenter le niveau global. Si dix sources de bruit "négligeable" de 70 dB sont combinées à une source de 80 dB, le niveau résultant est de 83 dB. Par chance, en acoustique du bâtiment, il est rarement nécessaire de combiner des niveaux de bruits de cette façon ou d'effectuer de nombreux calculs compliqués avec des décibels ou d'autres unités logarithmiques. Ces exemples illustrent simplement les particularités de l'échelle des décibels.

Filtres et spectres

Les variations de pression associées à de nombreux sons ont une configuration répétitive. Cela est particulièrement vrai pour les sons musicaux. La fréquence d'un phénomène répétitif ou périodique est le nombre de fois que la configuration se répète en une seconde. On entend les sons aigus ou de fréquence élevée lorsque les variations de pression dans l'air se produisent rapidement, plusieurs milliers de fois par seconde. La fréquence est exprimée en hertz (Hz). Ainsi, une note de musique de fréquence 1200 Hz possède une configuration fondamentale de variations de pression qui se répète 1200 fois par seconde. En acoustique du bâtiment, il est important de connaître les diverses fréquences qui constituent les sons car des fréquences différentes se comportent différemment.

Les sons ordinaires que l'on entend dans les bâtiments sont complexes, sans configuration clairement définie, et ils sont habituellement appelés bruits. En général, on ne peut associer une fréquence ou un ton évidents à ces bruits, bien qu'on puisse distinguer des caractéristiques tonales telles que le "grondement" ou le "sifflement". Malgré cela, il est possible d'analyser des bruits en fonction de l'énergie contenue dans certains intervalles de fréquence. Il s'agit alors de l'analyse spectrale.

Un spectre à bande étroite montre de façon détaillée l'énergie présente à chaque fréquence. La figure 2a illustre la configuration temporelle répétitive d'une source sonore et le spectre à bande étroite correspondant. Ce type d'information est très utile dans certains cas, mais, la plupart du temps, il est beaucoup trop détaillé; en acoustique du bâtiment, on utilise couramment les spectres de bandes standard d'un tiers d'octave ou d'un octave. Le terme octave a le même sens en acoustique du bâtiment qu'en musique : les fréquences des bandes d'octave adjacentes ont un rapport de deux à un. Des bandes de tiers d'octave adjacentes sont distantes d'un tiers d'octave. On obtient ce type de spectre lorsque les

énergies dans des régions spécifiées du spectre à bande étroite sont additionnées pour donner les niveaux par bande d'octave ou de tiers d'octave. Ce type de représentation fournit des données plus conformes à la perception de l'oreille. Les figures 2b et 2c représentent les spectres de bande d'octave et de tiers d'octave obtenus à partir du spectre à bande étroite de la figure 2a.

À la figure 2, l'axe horizontal représente la fréquence ou la bande de fréquence particulière du bruit et l'axe vertical, le niveau de pression acoustique ou l'énergie correspondant à la fréquence ou à la bande de fréquence donnée.

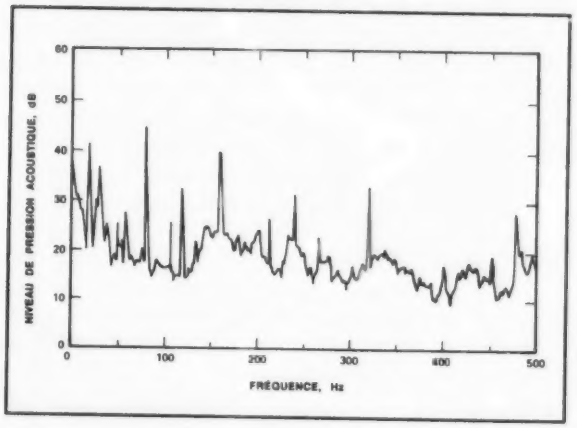

Figure 2a

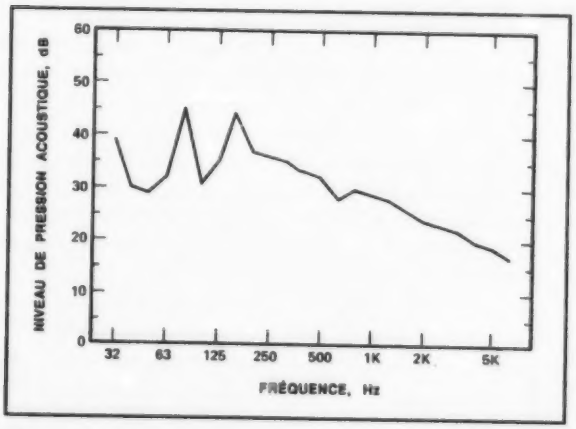

Figure 2b

Le spectre de bande de tiers d'octave d'une source de bruit particulière fournit une information importante, mais il est plus commode d'utiliser un indice numérique unique. Les niveaux pondérés A permettent de décrire un bruit complexe à l'aide d'un nombre unique. La sensibilité de l'oreille n'est pas la même à toutes les fréquences; des sons de même niveau de pression mais de fréquences différentes ne sont pas perçus avec la même intensité. Par exemple, un son de 3 kHz et 54 dB semblera de même intensité sonore qu'un son de 50 Hz et 79 dB.

La courbe discontinue de la figure 3 représente la réaction idéalisée de l'oreille à des niveaux sonores intermédiaires tandis que la courbe continue est une approximation de la réaction de l'oreille; cette dernière est appelée courbe de pondération A.

Le signal émis par un microphone ou un sonomètre peut être modifié à l'aide d'un filtre électrique de pondération A de façon qu'il représente plus fidèlement la réaction de l'oreille. Les niveaux de pression acoustique résultants sont exprimés par un nombre suivi du symbole dBA.

Des bruits ayant des niveaux pondérés A identiques peuvent avoir des spectres assez différents. Ils peuvent aussi évoquer des réactions assez différentes chez les gens. L'emploi de termes péjoratifs tels que geignement, crissement, grincement, grondement et sifflement pour décrire les sons montrent que l'être humain est bien conscient des différences spectrales. D'autres termes

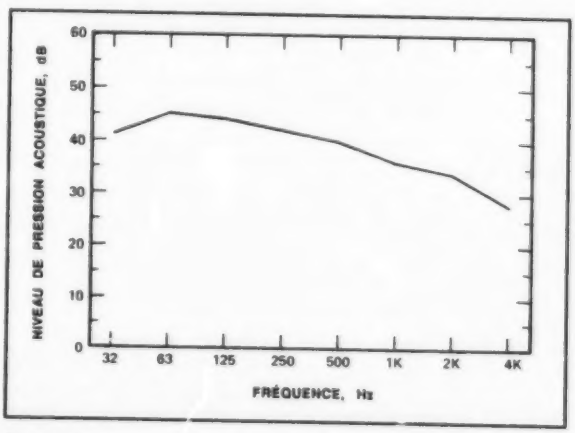

Figure 2c

couramment utilisés comme intensité sonore, bruyance, et gêne ne sont pas du tout synonymes et ne sont pas non plus reliés clairement au niveau de pression acoustique. Malgré ses lacunes, cette méthode simpliste de classification des bruits est souvent utilisée.

Courbes de critères du bruit

Les bruits dans les bâtiments peuvent aussi être décrits à l'aide d'une autre méthode basée sur un ensemble de courbes de bandes d'octave appelées critères de bruit ou courbes NC (Noise criteria). Ces courbes sont couramment utilisées en Amérique du Nord pour les travaux relatifs au chauffage, à la ventilation et au conditionnement d'air, ainsi que dans d'autres domaines de l'acoustique du bâtiment, pour spécifier les niveaux de pression acoustique maximaux dans les pièces. Ces courbes permettent d'évaluer facilement le niveau de bruit et, dans une certaine mesure, le spectre de bruit d'une pièce. La figure 4 illustre deux exemples d'utilisation de ces courbes. Le spectre du son considéré est tracé sur le même graphe que les courbes NC. Le point de rencontre du spectre et de la courbe NC la plus élevée détermine l'indice NC du spectre. Les valeurs sont attribuées approximativement lorsque le spectre se trouve entre les courbes NC. Deux spectres peuvent avoir la même valeur NC, mais des formes assez différentes. Même si la relation entre le niveau pondéré A et l'indice NC dépend du spectre, le niveau pondéré A est en général supérieur d'environ 7 dB à l'indice NC. Les courbes NC ne décrivent pas les spectres de bruit neutre que l'on doit rechercher comme objectif de conception. En fait, ils ont été associés à une combinaison de "grondement et sifflement". Les spectres de bruit de fond avec moins d'énergie à hautes et basses fréquences apparaissent généralement plus acceptables.

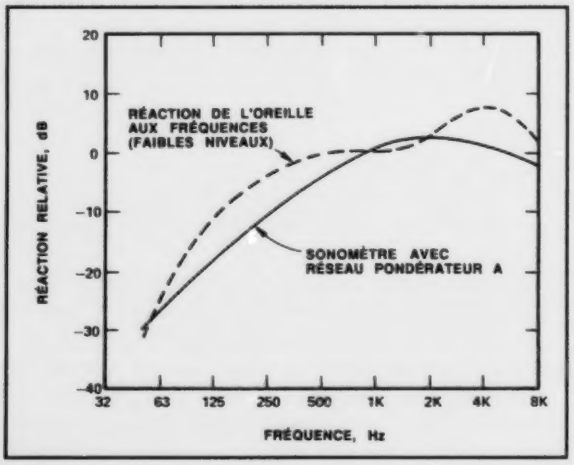

Figure 3

Les publications récentes du guide ASHRAE contiennent des courbes RC qui visent à représenter des spectres de sons neutres bien équilibrés. Ces indices, destinés à remplacer les courbes NC et à donner une indication de l'acceptabilité du bruit de fond, commencent à être de plus en plus utilisées en Amérique du Nord. Malgré ce nouveau système, il convient de poursuivre les recherches pour pouvoir évaluer avec plus de précision l'acceptabilité subjective des bruits dans les bâtiments.

Mesures normalisées en acoustique du bâtiment

La conception acoustique des bâtiments requiert des données quantitatives sur les produits, les matériaux et les systèmes acoustiques afin que les critères de conception

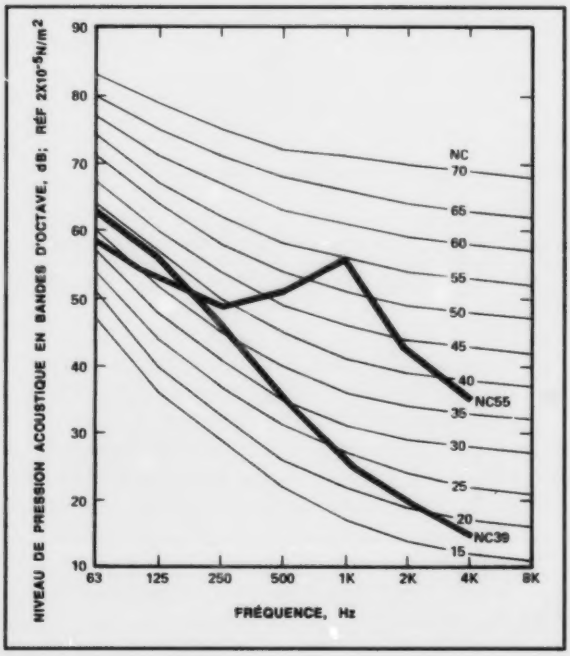

Figure 4

recommandés puissent être respectés. Un certain nombre d'essais acoustiques sont utilisés au laboratoire et dans les bâtiments pour obtenir ce type d'information et pour vérifier que le bâtiment répond aux objectifs du concepteur.

La plupart des mesures de lutte contre le bruit dans les bâtiments tiennent compte de l'absorption acoustique et de la perte de transmission du son, qui sont les deux principales propriétés acoustiques des matériaux et des systèmes utilisés. La puissance acoustique est par contre la caractéristique la plus importante des machines utilisées dans les bâtiments.

Gamme de fréquences

Les mesures prises en acoustique du bâtiment sont généralement effectuées en bande de tiers d'octave d'environ 100 Hz à 4000 Hz. Bien que des fréquences inférieures à 100 Hz soient présentes dans les bâtiments, il est assez difficile de mesurer de façon significative les très basses fréquences en raison des effets de résonance dans les pièces. La fréquence supérieure maximale peut s'élever à 15 000 Hz lors de mesures spécialisées, par exemple dans les salles de concert; des fréquences dans la bande d'octave de 31 Hz sont parfois mesurées avec les installations de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air.

Absorption acoustique

Le coefficient d'absorption acoustique équivaut à la fraction de l'énergie sonore incidente qui est absorbée par un matériau; il est quelquefois exprimé sous forme de pourcentage. Le son est absorbé lorsqu'une partie de l'énergie sonore qui frappe une surface ou un objet est convertie en énergie thermique dans les pores du matériau. Le coefficient d'absorption dépend de la fréquence du son et de l'angle d'incidence des ondes sonores sur le matériau. Les coefficients d'absorption fournis par les fabricants sont généralement obtenus lors d'essais dans une salle réverbérante (figure 5). Ces essais donnent une valeur moyenne pour chaque bande de tiers d'octave et pour tous les angles d'incidence. Les données correspondent généralement à six fréquences normalisées (125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz). Cependant, la plupart des laboratoires modernes fournissent des données pour toutes les bandes de tiers d'octave d'environ 100 Hz à 5000 Hz. La figure 6 est un exemple de graphique obtenu avec les résultats d'un essai d'absorption.

L'absorption acoustique d'un échantillon de matériau ou d'un objet est mesurée en sabins ou en sabins métriques. Un sabin représente une unité de surface (1 m^2 ou 1 pi^2) possédant un coefficient d'absorption de 1,0 (100 %). Lorsque les surfaces sont mesurées en mètres carrés, on emploie l'expression sabin métrique. On trouve l'absorption d'un matériau en multipliant sa surface par son coefficient d'absorption acoustique. Ainsi, pour un

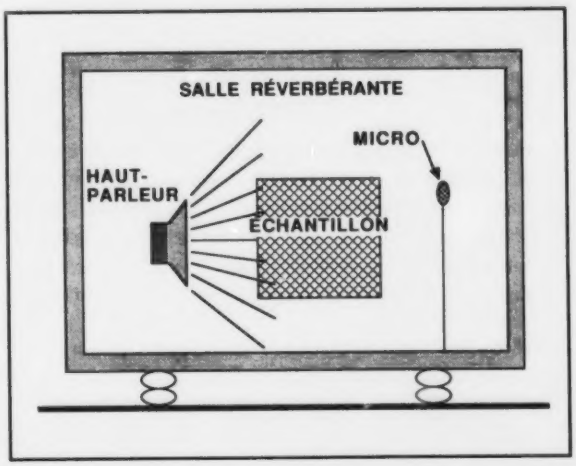

Figure 5

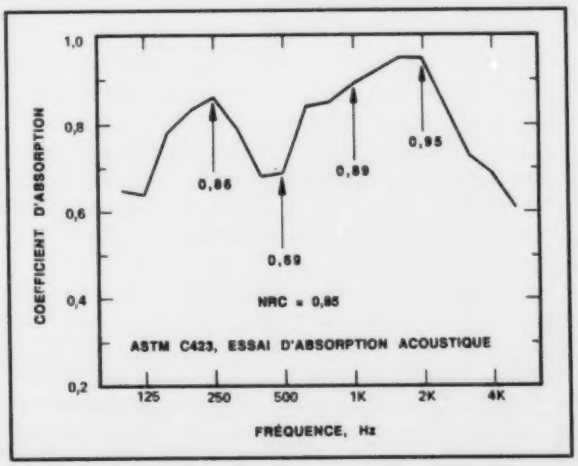

Figure 6

matériau ayant un coefficient d'absorption de 0,5, une surface de 10 pi² présente une absorption acoustique de 5 sabins et une surface de 100 m², de 50 sabins métriques.

Coefficient d'affaiblissement acoustique

Le coefficient d'affaiblissement acoustique (Noise reduction coefficient, NRC), aussi illustré à la figure 6, représente la moyenne des quatre coefficients d'absorption acoustique à 250, 500, 1000 et 2000 Hz. Cet indice numérique unique est commode pour classer les efficacités moyennes de différents matériaux. Cependant, pour un calcul acoustique plus complet, il faut tenir compte des coefficients individuels à chaque fréquence.

Perte de transmission du son

Lorsque des ondes sonores rencontrent une cloison, celle-ci se met à vibrer sous l'effet des variations de pression et reçoit une partie de la puissance de l'onde sonore. Toute cette énergie vibratoire, ou une partie de celle-ci suivant la construction, réapparaît de l'autre côté de la cloison, d'où elle est rayonnée de nouveau sous forme de son.

La différence entre la puissance acoustique incidente d'un côté de la cloison et la puissance rayonnée de l'autre côté (les deux puissances étant exprimées en décibels) est appelée la perte de transmission (Transmission loss, TL). Plus la perte de transmission est élevée (en décibels), plus la quantité d'énergie sonore traversant la cloison est faible.

La perte de transmission par une cloison augmente généralement avec la fréquence du son incident et varie aussi avec la direction des ondes sonores. Lorsque la perte de transmission est mesurée en laboratoire, le mur ou le plancher à l'essai sépare deux pièces hautement réverbérantes et, idéalement, il n'est pas lié rigidement à l'une ou l'autre de ces pièces. Un champ acoustique aléatoire est produit dans une des pièces, et l'énergie acoustique émise traverse la cloison pour passer dans la seconde pièce ou pièce de réception (figure 7). La différence de niveau de pression acoustique moyen entre les deux pièces est appelée l'affaiblissement acoustique. Le niveau dans la pièce de réception est déterminé en partie par la surface de la cloison et par l'absorption totale de cette pièce. Après correction en fonction de ces deux facteurs, l'affaiblissement acoustique devient la perte de transmission, qui est une propriété de la cloison quelles que soient sa taille et les propriétés des salles d'essai. La figure 8 représente un graphique de la perte de transmission en fonction de la fréquence.

Indice de transmission du son

Tout comme d'autres mesures acoustiques, les mesures de perte de transmission sont plus aisément représentées à l'aide d'un nombre unique. En Amérique du Nord, ce nombre est appelé l'indice de transmission du son (Sound transmission class, STC). Plus le STC est élevé, meilleures sont les caractéristiques acoustiques de la

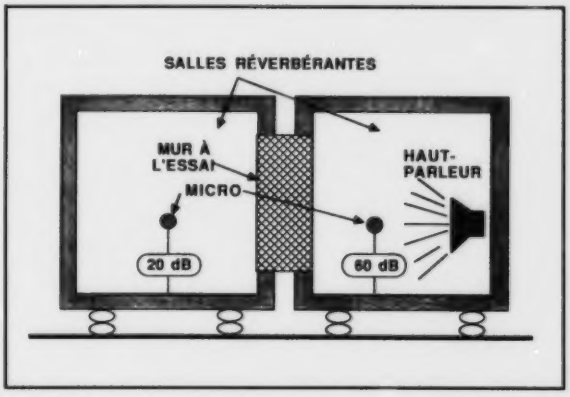

Figure 7

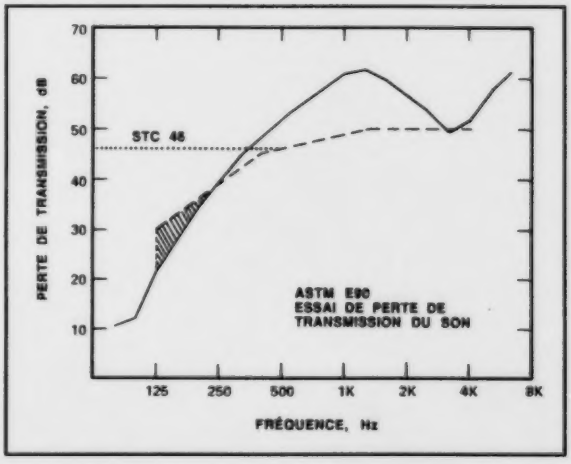

Figure 8

cloison, c'est-à-dire qu'une quantité d'énergie moindre la traverse. La figure 8 montre la courbe STC de référence ajustée à la courbe TL de la cloison. En premier lieu, la courbe de référence s'étend de 125 à 4000 Hz et l'indice est basé seulement sur les 16 valeurs de TL se trouvant à ces fréquences. En bref, la courbe de référence est ajustée jusqu'à ce que la somme des différences entre cette courbe et la courbe TL soit inférieure ou égale à 32 dB (zone grise dans la figure). En second lieu, la courbe TL ne doit pas être inférieure de plus de 8 dB à la courbe de référence, quelle que soit la fréquence. La valeur de la courbe de référence à 500 Hz détermine la valeur STC de la cloison. Les laboratoires étendent souvent la plage des mesures aux fréquences plus faibles et plus élevées pour obtenir des données supplémentaires.

La perte de transmission peut également être mesurée dans les bâtiments; on obtient alors un indice de transmission du son in situ (Field sound transmission class, FSTC). La lettre F indique simplement que les mesures ont été effectuées dans un bâtiment et non en laboratoire. L'essai in situ peut être effectué de façon que la totalité des voies de transmission soient incluses dans la mesure. On ne cherche pas à éliminer certaines voies de transmission, car il est évident que l'occupant est soumis aux effets de toutes les voies de transmission acoustique possibles. L'indice ainsi obtenu représente réellement le niveau d'intimité acoustique des occupants.

Pour éviter la complexité des essais et les pertes de temps associées au mesurage des pertes de transmission dans au moins 16 bandes de fréquence, on a mis au point une méthode d'essai simplifiée qui donne un indice numérique unique à partir de mesures simples. Elle permet de déterminer la différence de niveau de pression pondéré A entre deux pièces, corrigée en fonction des propriétés des pièces. La valeur ainsi obtenue se situe un ou deux points en deça des valeurs FSTC. Cet indice peut s'avérer très utile pour le contrôle de la qualité dans les bâtiments, car il permet de vérifier qu'aucune erreur grave n'a été commise et que l'isolement acoustique se rapproche de la valeur recherchée lors de la conception.

Bruits d'impact

Les bruits de pas et autres sont une source courante de gêne dans les bâtiments. Une méthode d'essai utilisée depuis plusieurs années donne des indices numériques uniques pour la transmission des bruits d'impact à travers les planchers. Dans cet essai, mis au point en Europe, une machine à frapper normalisée comportant cinq marteaux cogne sur le plancher à raison de 10 coups par seconde. Les niveaux de pression acoustique sont mesurés dans la pièce du dessous (figure 9) en bandes de tiers d'octave; la courbe résultante est ajustée à la courbe de référence pour donner un indice numérique unique, l'indice de l'isolement aux bruits d'impact (Impact insulation class, IIC). Un exemple de ce résultat est illustré à la figure 10, où les parties grises déterminent la valeur de l'IIC. Contrairement au graphique de perte de transmission, plus les niveaux de pression acoustique mesurés sont élevés, plus les caractéristiques acoustiques du plancher sont mauvaises. Cependant, l'IIC est proportionnel à la protection fournie par le plancher contre ce type de choc particulier. L'indice de l'isolement aux bruits d'impact peut être déterminé en laboratoire ou in situ. À l'heure actuelle, seule la France effectue un essai de bruit d'impact simplifié équivalent à l'essai de bruit aérien simplifié.

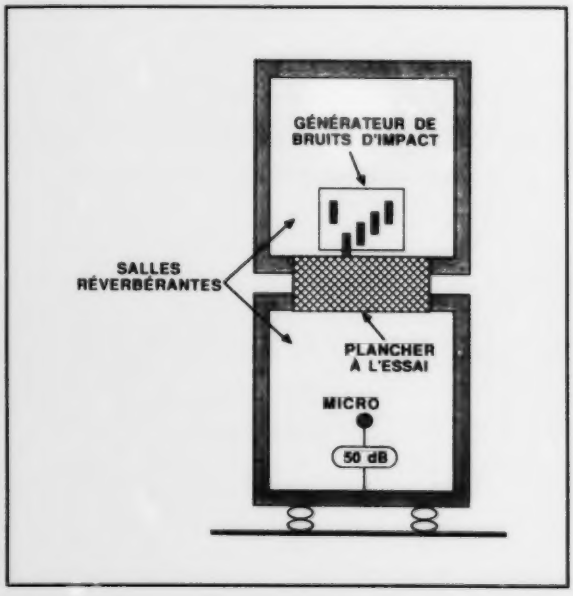

Figure 9

Bruit de machinerie

Divers essais en laboratoire et in situ peuvent servir à mesurer la puissance acoustique des machines. La machine peut être placée soit dans une salle d'essai très réverbérante, soit dans une salle semi-anéchoïque ou in situ. Les résultats sont généralement présentés sous forme d'un graphe et d'un tableau indiquant la puissance dans chaque bande de fréquences et la puissance pondérée A. La puissance acoustique des machines utilisées dans un bâtiment devrait être déterminée au tout début de la conception acoustique. Si une machine silencieuse et bien équilibrée est spécifiée, il deviendra superflu d'ajouter des silencieux, des matériaux absorbants et des cloisons à perte de transmission élevée pour lutter contre le bruit. Il est toujours plus avantageux de réduire le bruit à sa source lorsque c'est possible.

Les méthodes d'essai décrites ci-dessus, à l'exception des essais de puissance acoustique, sont toutes des méthodes ASTM. Le titre de l'essai et le numéro ASTM sont donnés au tableau 2 à des fins de référence.

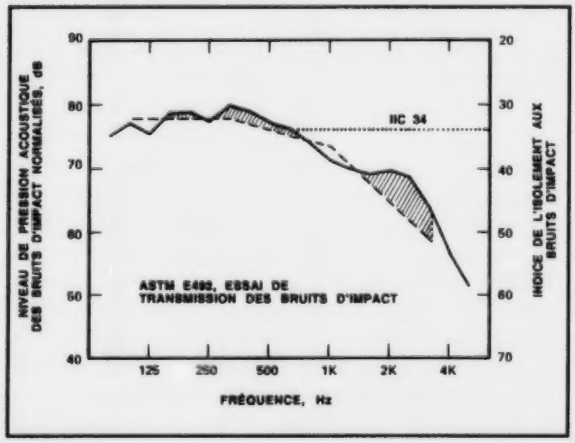

Figure 10

Tableau 2 Essais ASTM utilisés en acoustique du bâtiment.

E90	Standard method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partition.
E336	Standard test method for measurement of airborne sound insulation in buildings.
E413	Standard classification for determination of sound transmission class.
E597	Standard practice for determining a single number rating of airborne sound isolation for use in multi-unit building specifications.
E492	Standard method of laboratory measurement of impact sound transmission through floor-ceiling assemblies using the tapping machine.
E1007	Standard test method for field measurement of impact sound transmission through floor–ceiling assemblies and associated support structures.
E989	Standard classification for determination of impact insulation class.

Méthodes fondamentales de lutte contre le bruit

Absorption acoustique et réverbération

L'insonorisation d'un local peut être obtenue par la dégradation de l'énergie sonore dans des matériaux absorbants. Le son est absorbé lorsqu'une partie de l'énergie sonore frappant une surface n'est pas réfléchie, mais passe dans le matériau où elle est convertie en énergie thermique. En général, les fréquences élevées sont plus facilement absorbées que les basses fréquences. Le son traverse relativement facilement les matériaux qui sont de bons absorbants; ainsi, les absorbants acoustiques ne constituent généralement pas de bonnes barrières acoustiques. Ils réduisent le niveau de bruit à l'intérieur d'une enceinte, car lorsque les ondes sonores se réfléchissent sur les parois, elles entrent en contact avec le matériau absorbant et perdent chaque fois de l'énergie.

Cependant, il faut un matériau absorbant très épais ou de nombreuses réflexions pour que l'énergie sonore soit notablement réduite. Il est important de bien comprendre la différence entre absorption acoustique et perte de transmission. Les matériaux qui empêchent le passage du son sont généralement solides, assez lourds et non poreux. Cent cinquante millimètres de fibre de verre constituent un bon absorbant acoustique, et cent cinquante millimètres de béton coulé, une bonne barrière acoustique.

Les matériaux absorbants sont utilisés pour réduire le niveau de bruit uniforme dans une salle, le bruit d'une machine par exemple, et pour réduire la réverbération. La réverbération d'une salle est généralement caractérisée par le temps de réverbération, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'énergie d'une source sonore brusquement interrompue décroisse de 60 dB. Le temps de réverbération varie avec la fréquence, de la même façon que l'absorption acoustique. Il n'existe pas d'indice unique pour résumer les temps de réverbération, mais on utilise souvent la valeur à 500 Hz.

Montage résilient

La plupart des machines produisent des vibrations qui peuvent être transférées à la structure d'un bâtiment par l'intermédiaire des supports de la machine. Ces vibrations peuvent être atténuées si l'on équilibre les machines de façon à réduire les forces à la source. De même, la transmission des vibrations à la structure du bâtiment peut être amoindrie si l'on utilise des dispositifs résilients et antivibrations entre la machine et sa structure portante. Les matériaux couramment utilisés comme isolants antivibrations sont le caoutchouc, le liège, divers types de ressorts métalliques et des coussins en fibre de verre. La transmission de l'énergie vibratoire dépend de la fréquence de résonance de la machine, des appuis souples et de l'amortissement de l'énergie dans le système. La conception ou le choix d'un appui résilient est un problème complexe et c'est pourquoi il vaut mieux s'adresser à un spécialiste. Cependant, il est important de savoir à quel endroit il convient d'utiliser ce type de dispositif.

Combinaison de techniques

Presque toutes les mesures de lutte contre le bruit comportent trois éléments importants. La figure 11 illustre une source de bruit reposant sur des appuis souples à l'intérieur d'une enceinte chemisée de matériau absorbant et dont la perte de transmission est élevée. Si on omet les appuis souples, les vibrations de la machine se transmettent à la structure du bâtiment avec très peu d'atténuation et sont rayonnées ailleurs sous forme de sons aériens. En l'absence d'une enceinte, les sons traversent le matériau absorbant presque sans être atténués. Si par contre on enlève le matériau absorbant, les sons réverbérés s'accumulent et la perte d'énergie à travers l'enceinte est bien inférieure à la valeur prévue. Les trois éléments sont donc essentiels.

L'application correcte de ces trois mesures est la condition indispensable d'une acoustique bien conçue et d'une lutte contre le bruit efficace. Que l'enceinte soit un boîtier juste assez grand pour contenir une imprimante, une grande pièce renfermant plusieurs machines très bruyantes ou le salon d'un appartement, les principes restent les mêmes : une bonne insonorisation nécessite des appuis ou des joints résilients, des matériaux absorbants et des barrières acoustiques sans fuites.

La rigueur avec laquelle ces mesures doivent être appliquées dépend d'un certain nombre de facteurs. Si l'on choisit des machines silencieuses et qu'on les installe aussi loin que possible des zones de calme, le nombre de mesure à prendre pour lutter contre le bruit s'en trouvera réduit. Bien entendu, il n'est pas toujours possible de maîtriser les sources de bruit dans un bâtiment puisque parfois, ce sont les occupants eux-mêmes qui en sont la cause.

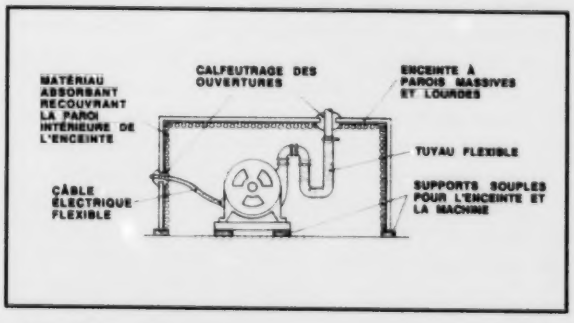

Figure 11

Acoustique des locaux

J.S. Bradley

Introduction

Les locaux sont en général destinés à des activités bien précises. Leurs conditions acoustiques doivent être telles que les activités prévues soient favorisées au maximum et en aucune façon entravées par le local lui-même. Deux aspects fondamentaux déterminent les conditions acoustiques d'un local : (1) le degré de bruit de fond et (2) les propriétés acoustiques de la pièce elle-même, déterminées par la géométrie et les matériaux utilisés. Les niveaux de bruit de fond ne doivent pas dépasser la valeur maximale appropriée suivant l'usage prévu de la pièce ou l'on peut, par exemple, dormir, écouter quelqu'un ou encore mener des activités industrielles. Les conditions acoustiques des locaux sont ordinairement évaluées en fonction d'un temps de réverbération optimal. Chaque type d'utilisation requiert des niveaux de bruit de fond et des conditions acoustiques différents.

Une bonne conception acoustique des locaux comporte trois étapes : il faut (1) choisir des critères optimaux suivant l'utilisation prévue, (2) concevoir en vue de satisfaire ces critères et (3) vérifier que les objectifs ont été atteints dans le bâtiment terminé. Ces trois étapes sont essentielles pour parvenir au résultat voulu. Alors que le concepteur détermine les critères optimaux pour chaque salle, ce sont aux conseillers en mécanique et en acoustique de vérifier que le bâtiment présente les conditions acoustiques désirées. Bien que certains détails de conception cruciaux et les problèmes particuliers de salles telles que les auditoriums requièrent les connaissances et l'expérience de spécialistes, les principes fondamentaux qui s'appliquent à plusieurs types de locaux sont assez simples.

Principes acoustiques fondamentaux

Puissance acoustique et pression acoustique

La pression acoustique, qui se mesure facilement à l'aide d'un microphone et d'appareils électroniques connexes, est liée à la perception que l'on a de l'intensité du son et dépend de la position du microphone par rapport à la source ainsi que des conditions acoustiques du local. Ainsi, une source de bruit particulière produit des pressions acoustiques différentes dans des pièces différentes car le son paraîtra plus ou moins fort selon la pièce. La pression acoustique n'est pas simplement une propriété de la source, mais plutôt une combinaison des propriétés de la source, des propriétés de la pièce et de la distance entre la source et le récepteur. La puissance acoustique d'une source, par contre, est essentiellement constante. C'est une propriété de la source seulement.

Il y a analogie entre une source de bruit et une ampoule électrique. Une ampoule électrique donnée doit consommer un nombre particulier de watts. L'ampoule consommera toujours la même puissance, quel que soit son environnement. Cependant, la même ampoule peut sembler mieux éclairer une pièce dont les surfaces sont réfléchissantes et brillantes qu'une autre pièce aux murs noirs et ternes. De même, l'ampoule peut être adéquate dans une petite pièce, mais elle peut sembler très faible dans une grande salle. Cet exemple correspond exactement à la situation acoustique.

Il est beaucoup plus utile de connaître la quantité de puissance acoustique produite par une source que la pression acoustique mesurée dans des conditions particulières. Il convient donc de chercher à obtenir les puissances acoustiques de toutes les sources de bruit potentielles à l'étape de la conception. On peut alors calculer les niveaux de pression acoustique résultants dans une pièce quelconque si les niveaux de puissance acoustique de la source et certaines propriétés de la pièce sont connues. L'équation (1) de l'annexe 1 peut être utilisée à cette fin.

Niveaux sonores stables dans les salles

Les niveaux de bruit dans les locaux varient avec la distance de la source et les propriétés du local. À l'extérieur (en l'absence de toute surface réfléchissante), les niveaux sonores diminuent à mesure qu'on s'éloigne de la source. Les pressions acoustiques décroissent de façon inversement proportionnelle à la distance de la source, c'est-à-dire que les niveaux sonores diminuent de 6 dB chaque fois que double la distance de la source. Ce phénomème s'applique lorsque la source rayonne de l'énergie sonore à peu près également dans toutes les directions et qu'il existe une seule voie de transmission de la source au récepteur. Dans un local par contre, les voies de transmission de la source au récepteur sont très nombreuses et comprennent diverses réflexions sur les parois du local; la combinaison de toutes ces voies de

transmission détermine le comportement du son dans cette pièce. En conséquence, lorsque la distance de la source augmente, les niveaux sonores dans un local ne diminuent pas de la même façon pour toutes les distances.

La figure 1 donne quelques exemples de variations des niveaux sonores en fonction de la distance d'une source dans un local type de 2000 m^3. Au début, les niveaux sonores diminuent à mesure que s'accroît la distance de la source, comme c'est le cas en l'absence de réflexion. À une certaine distance de la source, les niveaux sonores deviennent relativement constants lorsque la distance continue d'augmenter. Près de la source, les niveaux sonores dépendent des propriétés de la source et de sa distance, mais, plus loin, ils sont assujettis avant tout à l'énergie sonore réverbérée, qui dépend des propriétés du local. Plus les parois de la pièce sont dures et réfléchissantes, plus l'énergie sonore réverbérée est grande et les niveaux sonores réverbérés dans la salle sont élevés. Par contre, pour un matériau donné, les niveaux sonores du champ réverbéré diminuent lorsque la surface augmente en raison de la quantité accrue d'énergie réverbérée absorbée.

Les figures 1a et 1b montrent des exemples simples de mesure de lutte contre le bruit dans un local de 2000 m^3 ($30 \times 15 \times 4{,}5$ m). La figure 1a illustre l'effet que produit l'ajout d'un matériau absorbant dans ce local. La courbe continue supérieure correspond à une pièce où toutes les parois sont assez dures et réfléchissantes (coefficient d'absorption égal à 0,1 et absorption totale égale à 130 sabins métriques). Dans ce cas, le niveau sonore du champ réverbéré est relativement élevé. Si l'absorption totale est accrue jusqu'à 450 sabins métriques (lorsque le plafond est hautement absorbant), on obtient la courbe discontinue et le niveau du champ réverbéré prévu diminue de plus de 5 dB. Si l'absorption totale dans la salle est accrue à 800 sabins métriques, par exemple si le plafond et tous les murs sont recouverts d'un matériau hautement absorbant, on obtient la courbe mixte, avec une petite réduction supplémentaire des niveaux du champ réverbéré. Ainsi, le passage de toutes les surfaces dures et réfléchissantes à tous les murs et au plafond hautement absorbants se traduit par une réduction maximale de 8 dB des niveaux acoustiques réverbérés. En pratique, il est difficile d'obtenir une variation relative aussi importante. Comme la figure le montre aussi, les réductions des niveaux sont beaucoup plus faibles près de la source et la correction acoustique du local n'est efficace qu'en des positions éloignées de la source dans le champ réverbéré. [L'équation (2) de l'annexe 1 permet de calculer la réduction des niveaux sonores du champ réverbéré due à l'ajout du matériau absorbant.]

Pour lutter contre le bruit, on peut aussi utiliser un écran qui bloquera le son direct. La figure 1b montre l'effet prévu d'un écran qui réduit de 10 dB le son direct. Près de la source, les niveaux sonores sont réduits de plusieurs décibels, mais loin de la source, les niveaux sonores réverbérés deviennent constants.

Étant donné qu'un écran peut atténuer le son direct près de la source et que l'ajout d'un matériau absorbant peut

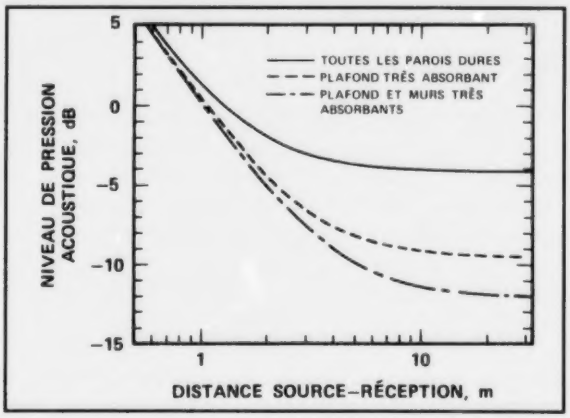

Figure 1a

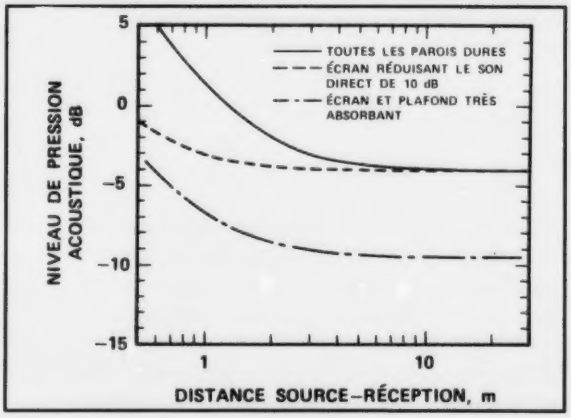

Figure 1b

réduire les niveaux sonores réverbérés loin de la source, la combinaison des deux peut être utile pour réduire globalement les niveaux sonores dans un local. La figure 1b montre également une telle combinaison pour un plafond hautement absorbant (comme dans la figure 1a) et un écran qui réduit le son direct de 10 dB. Il en résulte une réduction de 5 dB ou plus dans toute la pièce. Ces exemples illustrent les réductions possibles dans des situations réelles; on ne peut parvenir à de très grandes réductions des niveaux de bruit par une correction acoustique du local. Il est donc essentiel d'éliminer le bruit à la source en choisissant des dispositifs adéquats peu bruyants. L'assourdissement de la source est très difficile à réaliser après coup et l'installation d'enceintes spéciales pour réduire le bruit n'est souvent guère pratique pour des raisons telles que la nécessité de laisser l'accès libre au dispositif.

Matériaux absorbants

Les matériaux absorbants sont définis à l'aide de leur coefficient d'absorption acoustique mesuré sur une large gamme de fréquences. Les matériaux absorbants poreux peuvent être constitués de fibre de verre, de laine de roche, de mousse d'uréthane à cellule ouverte, de tissu ou d'autres matériaux perméables à l'air. Ils sont caractérisés par des coefficients d'absorption élevés aux hautes fréquences, qui diminuent aux plus basses fréquences suivant le type et l'épaisseur du matériau. La figure 2 représente des valeurs typiques du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour des échantillons poreux de 2,5 et 5,0 cm d'épaisseur. Ces matériaux absorbants résistent aux écoulements d'air associés aux vibrations sonores de l'air, et ils sont plus efficaces aux hautes fréquences car leur épaisseur est alors plus grande que la longueur d'onde du son. Étant donné que l'absorption diminue aux fréquences plus basses, des matériaux poreux absorbants de quelques centimètres d'épaisseur ne seront jamais très absorbants aux basses fréquences. Comme le montre la figure 2, on peut accroître l'absorption aux basses fréquences en ajoutant une lame d'air entre le matériau et le support rigide de sorte que le matériau absorbant se comporte comme s'il était plus épais.

Quand les sons de basses fréquences doivent être absorbés, il faut utiliser un type de système absorbant accordé spécifiquement pour ceux-ci. La figure 3 illustre l'absorption que l'on peut obtenir avec une membrane absorbante consistant en un panneau mince renfermant une lame d'air. Il s'agit d'un système résonant simple où la masse surfacique du panneau et la rigidité de la lame d'air déterminent la fréquence à laquelle l'absorption est maximale. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air augmente, sa rigidité réelle diminue. [Voir l'équation (3) à l'annexe 1.]

De même, les cavités présentant une petite ouverture sur le local peuvent être accordées sur une fréquence

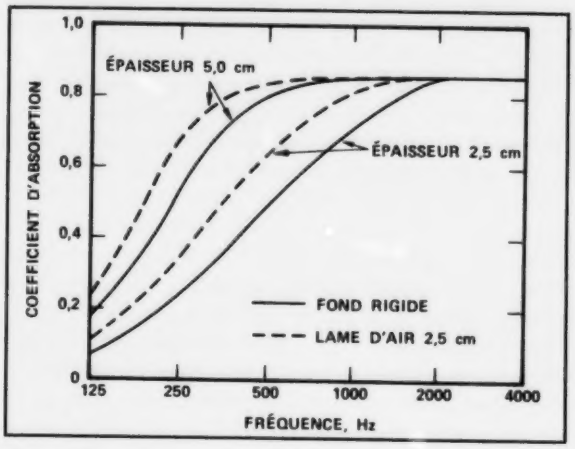

Figure 2

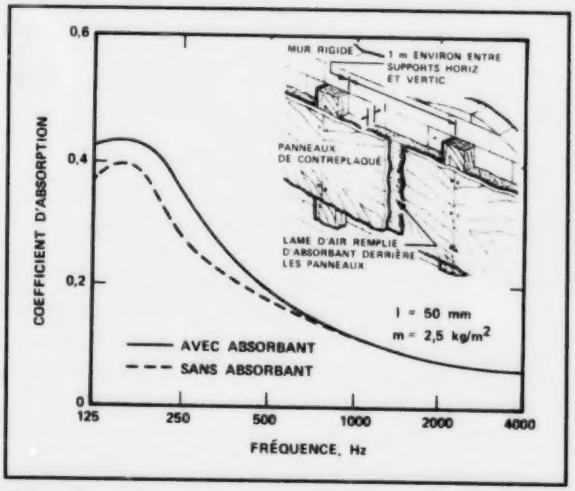

Figure 3

particulière à laquelle l'absorption est maximale. La figure 4 illustre les caractéristiques d'absorption d'une telle cavité absorbante résonante. On trouve le même principe dans les blocs de béton à fentes disponibles sur le marché. Ces blocs, combinés avec une couche de matériau absorbant poreux, peuvent permettre une absorption acoustique considérable sur une large gamme de fréquences. L'équation (4) de l'annexe 1 peut servir à prévoir la fréquence de résonance d'une cavité absorbante accordée.

Temps de réverbération

Bon nombre de types de locaux requièrent l'optimisation du temps de réverbération, qui se définit comme étant approximativement le temps nécessaire pour qu'un son fort devienne inaudible une fois l'émission sonore interrompue. Plus précisément, c'est le temps requis pour que le niveau sonore diminue de 60 dB une fois que la source a été interrompue brusquement. Le temps de réverbération est directement proportionnel au volume du local et inversement proportionnel à l'absorption totale du local. [Voir l'équation (5) à l'annexe 1.] Ainsi, des salles plus grandes ont tendance à avoir des temps de réverbération plus longs et sont considérées plus réverbérantes acoustiquement. Des locaux plus petits et des locaux comportant plus de matériaux absorbants sont moins réverbérants et peuvent être dits acoustiquement "sourds". Il existe aussi une relation entre l'augmentation du temps de réverbération et l'augmentation du niveau sonore réverbéré car les deux valeurs dépendent de la quantité totale de matériaux absorbants dans la salle. Ainsi, lorsqu'on tente d'amoindrir les niveaux du champ réverbéré en ajoutant un matériau absorbant, on réduit simultanément les temps de réverbération. Dans les salles prévues pour écouter (et surtout dans les locaux utilisés pour écouter de la musique), il convient de rechercher un temps de réverbération optimal. Lorsqu'il y a trop de réverbération, le mot se fond dans le suivant, ce qui réduit l'intelligibilité du discours. S'il n'y a pas assez de réverbération, il y a réduction des niveaux du champ réverbéré. (La conception des salles de conférences est examinée plus en détail dans une section subséquente.)

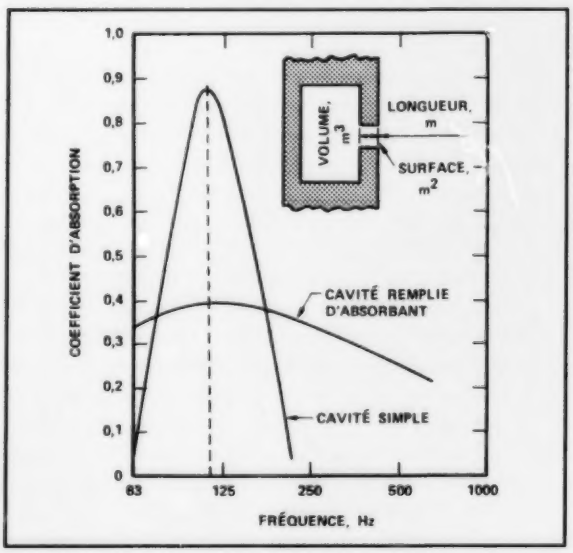

Figure 4

Critères de bruit pour les locaux

Il existe un certain nombre de méthodes pour évaluer l'acceptabilité des niveaux de bruit dans les bâtiments, et deux de ces méthodes s'appliquent à la plupart des situations. Le plus simple consiste à mesurer directement les niveaux sonores pondérés A globaux. Lorsqu'on a besoin de plus de détails, on utilise normalement la méthode d'évaluation des critères de bruit (Noise criteria, NC), qui requiert des mesures par bande d'octave (voir *Principes de la lutte contre le bruit*).

Un niveau de bruit de fond dans un local est acceptable lorsqu'il n'interfère pas avec les activités pour lesquelles le local est prévu. Dans les grandes salles industrielles, les limites de bruit peuvent être basées sur les niveaux relativement élevés tolérés par les règlements en matière de bruit au travail. À l'autre extrême, dans un studio d'enregistrement, presque tous les bruits audibles sont indésirables. Dans un grand nombre de locaux tels que les salles de classe et les salles de réunion, prévues pour la communication orale, des niveaux de bruit de fond assez bas interfèreront avec la précision et la qualité de la communication.

Le tableau 1 résume les niveaux de bruit maximaux optimaux acceptables pour diverses activités. Les limites supérieures correspondent aux limites d'exposition au bruit sur les lieux de travail, qui sont de 85 ou 90 dBA pour une journée de travail de huit heures. Ces niveaux visent à protéger les travailleurs contre la perte d'audition

Tableau 1 Niveaux de bruit maximaux optimaux acceptables pour diverses activités

Niveaux maximaux (dBA)	Activité	Exemples
85 ou 90	Limite de bruit au travail (par jour de 8 heures)	Usines et installations industrielles
75	Avertissement crié audible à 3 ou 4 mètres	Locaux industriels
65	Communication face à face acceptable	Ateliers, garages, salles de commande d'usine
55	Discours non critique pour les auditeurs proches	Lieus publics dans les bâtiments, vestibules, restaurants
48	Niveau sonore masquant maximum acceptable	Bureaux en espace ouvert
40	Bonne qualité de discours pour des groupes d'auditeurs proches, tâches demandant de la concentration	Bureaux privés, bibliothèques
35	Discours de grande qualité pour des groupes d'auditeurs (décroît avec le volume de la pièce)	Salles de classe, salles de réunion
30	Sommeil, discours de haute qualité pour des groupes particulièrement sensibles	Chambres à coucher, salles de classe pour de très jeunes enfants ou pour des élèves ayant des problèmes d'audition
25	Discours de haute qualité sans amplification, discours dans des salles plus grandes	Salles de concert et théâtres

permanente. Lorsque les niveaux de bruit de fond diminuent de 75 à 35 dBA, la qualité de la communication orale et la distance acceptable entre l'orateur et l'auditeur augmentent graduellement. À 75 dBA, les avertissements criés, souvent nécessaires pour la sécurité du travailleur, sont audibles sur une distance de quelques mètres. Un bruit de fond de 35 dBA ou moins permet une communication orale de grande qualité dans des locaux de dimensions similaires à celles des salles de classe. Les niveaux de bruit de fond doivent être plus faibles à mesure qu'augmente le niveau de la salle (ce point est examiné plus en détail à la section suivante).

Conception des locaux destinés à la communication orale

Une grande variété de locaux sont destinés presqu'entièrement à la communication orale. Ces locaux varient en taille depuis les petites salles de réunion et les salles de classe jusqu'aux grands auditoriums et centres de conférences. Lorsqu'un local a plus d'un usage, les critères visant des conditions excellentes de communication orale seront plus restrictifs que les critères s'appliquant à un grand nombre d'autres activités. Pour

assurer une bonne conception des grands auditoriums, des théâtres et autres salles plus complexes, il est essentiel de faire appel à un acousticien. Pour beaucoup de locaux plus petits, on peut obtenir des conditions de communication optimales en combinant un niveau de bruit de fond suffisamment bas et un temps de réverbération optimal. Les premières réflexions sont particulièrement importantes pour l'intelligibilité du discours et, lors du calcul de la géométrie de la salle et du choix des matériaux, il faut chercher à obtenir des premières réflexions qui soient fortes.

La figure 5 représente une courbe de conception simple qui montre les niveaux de bruit de fond maximaux optimaux à atteindre dans des locaux pour obtenir une intelligibilité excellente en fonction du volume du local. Le niveau de bruit de fond dans les locaux destinés à la communication orale ne devrait jamais excéder 35 dBA, et des locaux plus grands requièrent des niveaux de bruits de fond plus faibles. La courbe de conception a été obtenue à partir de courbes individuelles pour divers niveaux de discours allant d'un ton "normal" à un ton "élevé". Ainsi, à la figure 5, la courbe discontinue inférieure représente un ton "normal" et la courbe discontinue supérieure un ton "élevé". Dans de petits locaux, on s'attend à pouvoir parler avec un ton "normal", alors que dans des locaux plus grands, on s'attend raisonnablement à devoir élever la voix. Par conséquent, la courbe de conception (courbe continue) représente la combinaison de ces effets pour divers volumes des locaux. Dans des cas particuliers, des salles plus grandes peuvent être conçues de façon que la haute qualité du discours soit conservée à des tons de voix plus bas, comme c'est le cas d'un théâtre où l'on veut communiquer toute l'intention dramatique.

La figure 6 représente le temps de réverbération optimal pour la communication orale en fonction du volume du local. Lorsque le volume augmente, le temps de réverbération optimal augmente aussi. Puisque cette courbe indique un seul temps de réverbération optimal par volume, il est possible de calculer l'absorption totale optimale correspondant à chaque volume. La figure 7

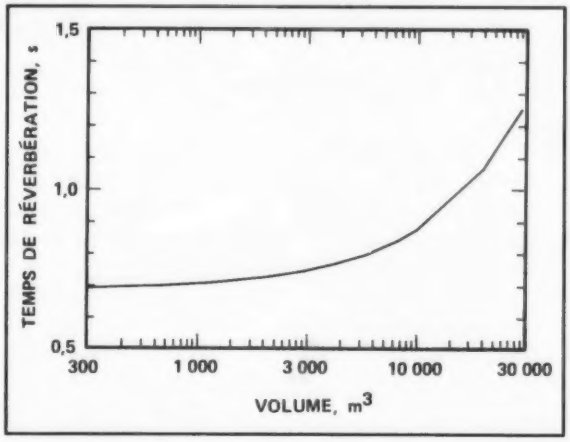

Figure 6

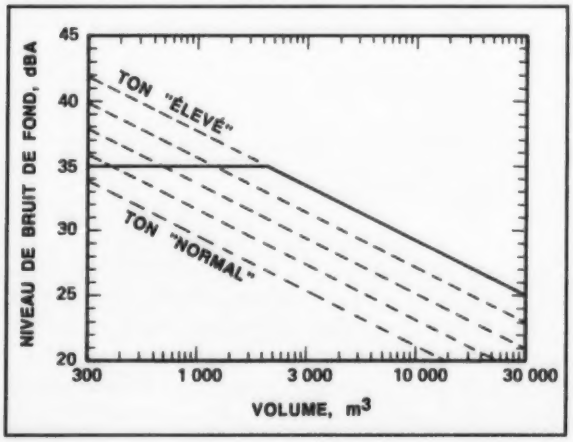

Figure 5

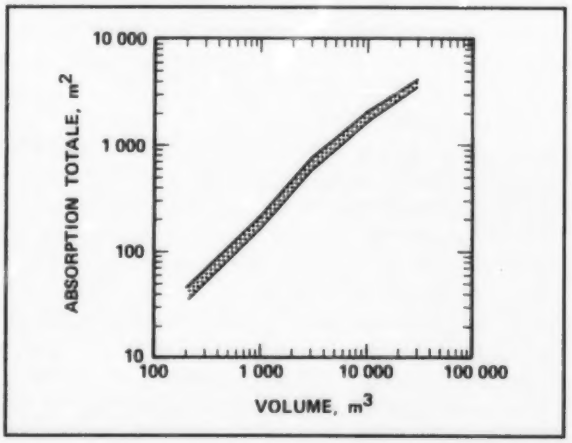

Figure 7

montre la plage résultante d'absorption totale acceptables (en sabins métriques) en fonction du volume du local (en mètres cubes) qui donne le temps de réverbération optimal désiré à ±0,1 seconde. Viser une absorption totale aussi proche que possible du centre de cette plage devrait conduire à des conditions de communication orale pratiquement optimales.

Des conditions acoustiques plus rigoureuses s'imposent avec certains groupes particuliers d'auditeurs afin qu'ils bénéficient d'une intelligibilité optimale. Ce sont, par exemple, les enfants d'une école élémentaire, des adultes à l'âge de la retraite et tous les malentendants. Pour ces groupes, il faut prévoir une réduction supplémentaire de 5 dBA des niveaux de bruit de fond et s'assurer de ne pas dépasser les temps de réverbération optimaux.

La géométrie et les matériaux superficiels d'un local destiné à la communication orale doivent être choisis de façon qu'il s'y produise des premières réflexions assez fortes; ces dernières devraient arriver environ 0,05 seconde après l'arrivée du son direct. En d'autres termes, la longueur du trajet de ces réflexions ne devrait pas excéder de plus de 15 mètres le trajet direct de la source au récepteur. Le système auditif fusionne ces premières réflexions avec le son direct, ce qui accroît l'intelligibilité du discours. Les réflexions sonores qui arrivent par la suite nuisent à l'intelligibilité. De nouvelles méthodes acoustiques ont été mises au point pour mesurer les avantages relatifs de ces premières réflexions et certaines nouvelles méthodes combinent même avec succès les mesures du bruit de fond et les propriétés acoustiques du local dans un seul paramètre. Cependant, ces méthodes ne sont pas encore très utilisées. Dans bon nombre de locaux moyens et plus petits, on peut raisonnablement chercher à obtenir un temps de réverbération optimal et à concevoir qualitativement le local en vue d'y accroître l'énergie des premières réflexions.

Les recommandations spécifiques relatives à la conception qualitative d'un local permettant d'accroître l'énergie des premières réflexions varient quelque peu avec la dimension et l'utilisation du local. Dans de petits locaux, comme les salles de classe, une personne peut vouloir parler de n'importe quel endroit du local. Bien que ces locaux requièrent de fortes premières réflexions, les figures 6 et 7 montrent qu'ils devraient avoir un temps de réverbération assez court, d'environ 0,7 seconde, et qu'ils devraient être dotés de matériaux absorbants [illegible] vit alors de savoir où ajouter le [illegible] diminuer la réverbération tout en [illegible] premières réflexions. La solution [illegible] sorte, si possible, que la [illegible] de même que les parties [illegible] dures et réfléchissantes. Le [illegible] plancher, sur les parties [illegible] mur–plafond. L'addition [illegible] zone du joint mur–plafond, par exemple de panneaux inclinés joignant le plafond aux murs, permet une absorption sur une large gamme de fréquences.

Dans les salles [illegible] grandes, la source se trouve généralement [illegible] extrémité comportant une estrade ou une plate-forme pour le conférencier. Il importe de concevoir cette zone de façon à diriger de fortes premières réflexions vers tous les auditeurs, en particulier vers ceux qui se trouvent le plus loin de l'orateur. Le mur arrière sera peut-être soit diffusant soit absorbant pour éviter les réflexions retardées qui pourraient être entendues comme des échos. Lorsqu'un local de moyenne ou de grande dimension est destiné presqu'entièrement à la communication orale, il est essentiel de s'adresser à un bon acousticien pour obtenir une pièce de grande qualité. Une attention particulière doit être portée aux salles polyvalentes, très souvent utilisées pour la communication orale. Par exemple, on ignore généralement les aspects acoustiques lors de la conception des gymnases scolaires. En pratique, les gymnases sont aussi utilisés comme salles de classe et ils servent souvent d'auditoriums ainsi que de salles communautaires le soir. Si l'on ne tient pas compte des aspects acoustiques, il est presque impossible d'utiliser les gymnases à ces autres fins.

Conception des bureaux en espace ouvert

Les bureaux en espace ouvert constituent un environnement acoustique très différent où l'on doit avant tout chercher à étouffer les bruits de voix. Ainsi, l'objectif est exactement opposé à celui poursuivi dans les salles conçues pour la communication orale et, tout au plus, on peut en arriver à un compromis. Il faut tout tenter pour absorber et bloquer les sons provenant d'une zone de

travail afin qu'ils n'atteignent pas les zones voisines, mais sans l'aide de murs.

En premier lieu, toutes les surfaces exposées doivent être couvertes de matériaux absorbants. Les plafonds doivent être hautement absorbants et les planchers recouverts de tapis. Les voies directes de transmission du son doivent être bloquées, là où c'est possible, avec des écrans agissant à la fois comme barrière acoustique et comme surface absorbante. Les écrans doivent avoir un STC d'au moins 20 (voir *Transmission du son à travers les éléments du bâtiment*), c'est-à-dire qu'ils doivent comporter une couche centrale imperméable d'au moins 2,4 kg/m^2. Les écrans doivent mesurer au moins 1,5 × 1,8 m et ils doivent rejoindre le plancher et les autres surfaces adjacentes. Toutes les grandes parties exposées des murs doivent aussi être traitées avec un matériau absorbant.

Même lorsque ce traitement a été effectué avec le plus grand soin, l'intimité acoustique entre deux zones de travail adjacentes ne peut être complète. Des systèmes électroniques de masquage du bruit sont souvent ajoutés pour introduire de bas niveaux de bruit neutre à large bande qui masquent la voix et les autres sons provenant des zones de travail voisines. Ce masquage n'est efficace que si le bruit a un spectre neutre, s'il est maintenu à un niveau sonore constant en tout temps, s'il est réparti de façon égale dans le bureau, à ±2 dB, et si le niveau de bruit de masquage n'est pas trop élevé. Lorsque les niveaux de bruit de masquage sont supérieurs à 48 dBA, les occupants commencent à élever la voix, ce qui augmente la gêne.

Lorsque la conception acoustique ne fait pas intervenir de compromis, l'espace peut être utilisé pour des activités qui ne nécessitent pas une grande concentration. Des problèmes particuliers de manque d'intimité acoustique peuvent se poser lorsque les appareils d'éclairage, les fenêtres ou les meubles réfléchissent le son de façon indésirable. Le bureau en espace ouvert dont le traitement acoustique est substantiel n'est pas une salle semi-réverbérante et les niveaux sonores réverbérés illustrés à la figure 1 n'existent pas. De même, il est inutile d'essayer de considérer le temps de réverbération d'un tel espace.

La méthode de conception adoptée pour les bureaux en espace ouvert ne s'applique pas aux écoles en espace ouvert, où, là encore, il est essentiel de pouvoir entendre ce qui se dit. Le principe d'une telle école est complètement en contradiction avec les objectifs de conception où l'on vise l'obtention de conditions acoustiques optimales pour la communication orale.

Bruits dus au chauffage, ventilation et conditionnement d'air (bruit HVAC)

Le bruit des installations mécaniques ou bruit HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) est la source la plus courante de bruit gênant dans la majorité des locaux. Bien qu'il s'agisse probablement d'un problème très courant, ce défaut demeure inexcusable car des méthodes de conception détaillées telles que celles du guide ASHRAE existent depuis de nombreuses années et sont souvent mises à jour. Les problèmes de bruit HVAC semblent être liés davantage à l'ignorance des méthodes de conception appropriées qu'à une technologie inadéquate. De telles méthodes de conception supposent une étude détaillée des installations de chauffage, ventilation et conditionnement d'air, et nous ne les décrirons pas ici. Cependant, nous en présentons les principes fondamentaux de façon que les concepteurs de bâtiments puissent avoir une idée des concepts généraux.

Il faut d'abord connaître les niveaux de puissance acoustique de chaque ventilateur, que l'on aura choisi en raison de ses faibles niveaux. En suivant les calculs, on peut ensuite déterminer quelle fraction de cette puissance acoustique pénètre dans chaque local desservi par le ventilateur. Les niveaux de puissance acoustique de chaque local sont convertis en niveaux de pression acoustique par bande d'octave selon les propriétés acoustiques du local, et les critères de bruit sont calculés. Les valeurs obtenues sont comparées aux critères de bruit établis pour le local et, lorsqu'elles sont supérieures à ces critères, d'autres mesures sont prises pour atténuer encore le bruit HVAC. Il ne faut pas oublier que l'énergie acoustique peut emprunter diverses voies. L'énergie vibratoire du ventilateur peut se propager par l'intermédiaire du plancher de la salle du ventilateur et par d'autres éléments de la structure du bâtiment, ainsi que par les parois du réseau de conduits. Les sons aériens du ventilateur peuvent se propager par le réseau de conduits dans les deux directions à partir du ventilateur, ainsi que dans la salle du ventilateur à partir de l'enceinte de ce dernier. Toutes ces voies de transmission peuvent

être très importantes et aucune ne doit être ignorée. Il est bien évident qu'un équipement mécanique potentiellement bruyant installé à un endroit inapproprié peut entraîner de graves problèmes de bruit; on ne peut pas simplement caser cet équipement dans n'importe quel coin inutilisé du bâtiment.

La méthode de conception globale est dans une certaine mesure itérative; si, après un calcul initial, les critères de bruit sont dépassés, des changements doivent être apportés et les calculs recommencés. En résumé, la méthode comprend les huit étapes suivantes :

(1) Choisir un emplacement approprié pour les salles d'équipement mécanique, loin des zones de calme du bâtiment.

(2) Choisir des ventilateurs ayant des niveaux de puissance acoustique faibles. Idéalement, les niveaux de puissance acoustique par bande d'octave devraient être connus à la fois pour le son rayonné dans le conduit et pour le son rayonné par l'enceinte du ventilateur dans le local où celui-ci est installé.

(3) Empêcher les vibrations du ventilateur de se propager. Pour cela, il faut désolidariser le ventilateur et le moteur du plancher, et installer un isolateur de vibration dans le conduit immédiatement après le ventilateur pour éviter la propagation de l'énergie vibratoire à travers les parois du conduit.

(4) Isoler acoustiquement le ventilateur. Les murs, le plancher et le plafond de la salle d'équipement doivent permettre une perte de transmission élevée du bruit aérien dans la salle d'équipement (voir les exigences afférentes dans *Transmission du son à travers les éléments d'un bâtiment*). Il faut réduire la propagation du son dans le conduit en installant un silencieux dissipatif immédiatement après l'isolateur de vibration. Le silencieux choisi doit permettre une atténuation adéquate dans chaque bande d'octave et il ne doit pas produire de bruit d'écoulement d'air excessif.

(5) Calculer l'atténuation du son qui se propage dans les conduits de façon à connaître la puissance acoustique qui pénètre dans chaque pièce.

(6) Évaluer les niveaux de puissance acoustique des bruits d'écoulement d'air dans chaque pièce. Les courbes brusques, les mécanismes de commande, les grilles, les diffuseurs et les combinaisons de dispositifs générateurs de bruit d'écoulement placés trop près les uns des autres entraînent une augmentation du bruit d'écoulement, lequel dépend largement de la vitesse de l'écoulement d'air. Il est donc possible d'atténuer considérablement le bruit en réduisant cette vitesse.

(7) Calculer la puissance acoustique combinée qui pénètre dans la pièce ainsi que les niveaux de pression acoustique par bande d'octave prévus dans chaque pièce. À partir de ces valeurs, calculer une valeur NC et la comparer avec les critères de bruit établis pour la pièce.

(8) Réduire davantage le bruit lorsque la valeur calculée excède les critères du bruit désirées. Si la source principale de bruit dans la pièce provient du bruit du ventilateur qui se transmet par les conduits, il y aurait avantage à installer un silencieux dissipatif amélioré. Si elle provient par contre du bruit d'écoulement, il faudrait poser un matériau absorbant sur les quelques derniers mètres du conduit. Le conduit devrait alors être légèrement plus large pour que les dimensions intérieures et les vitesses d'écoulement initiales restent les mêmes. On peut aussi envisager de réduire la vitesse d'écoulement d'air ou de modifier les dispositifs qui produisent les bruits d'écoulement.

ANNEXE 1 Équations de l'acoustique des locaux

Niveaux sonores dans les locaux

La relation entre le niveau de pression acoustique et le niveau de puissance acoustique dans un local semi-réverbérant peut être calculée à l'aide de l'équation ci-dessous. Cette équation est basée sur l'hypothèse d'un champ acoustique diffus dans lequel, en tous les points de la salle, des quantités égales d'énergie acoustique se propagent dans toutes les directions. Lorsque le local contient de grandes quantités de matériaux absorbants, ou si l'une des dimensions du local est beaucoup plus grande que l'autre, l'équation devient beaucoup moins précise.

$$SPL = SWL + 10 \log \{(Q)/(4\pi r^2) + 4/A\} - 0{,}2 \text{ dB} \quad (1)$$

où :

- SPL = niveau de pression acoustique, en décibels, par rapport à la pression de référence normalisée de 0,00002 Pa;
- SWL = niveau de puissance acoustique, en décibels, par rapport à la puissance de référence normalisée de 10^{-12} W;
- Q = facteur de directivité de la source dans une direction particulière à partir de la source. C'est le rapport entre l'énergie se propageant dans cette direction et la moyenne des énergies qui se propagent dans toutes les directions. Lorsqu'une source rayonne également dans toutes les directions, Q est égal à 1,0;
- r = distance entre la source et le récepteur, en mètres;
- A = absorption acoustique totale, en sabins métriques. Ce paramètre est égal au produit du coefficient d'absorption moyen et de la surface totale. L'absorption totale dans un local peut être calculée en additionnant les absorptions de chaque surface, l'absorption de chaque surface étant égale au produit de l'aire et de son coefficient d'absorption.

L'équation (1) permet de calculer la réduction prévue des niveaux sonores du champ réverbéré lorsqu'on ajoute un absorbant dans le local. Cette réduction peut être calculée plus simplement à partir de l'équation suivante :

$$SPL = 10 \cdot \log \{A_b/A_a\}, \text{ dB} \quad (2)$$

où :

- SPL = modification du niveau sonore,
- A_b = absorption acoustique totale avant la modification,
- A_a = absorption totale après la modification.

Absorbants acoustiques résonants

La fréquence de résonance d'une membrane absorbante accordée telle qu'un panneau de contreplaqué mince renfermant une lame d'air peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$f = 60 / \sqrt{ML} \quad (3)$$

où :

- M = masse par unité de surface de la membrane, en kilogrammes par mètres carrés,
- L = profondeur de la lame d'air, en mètres.

La fréquence de résonance d'une cavité absorbante accordée est donnée par l'équation suivante :

$$f = 55 \sqrt{s/(l \cdot V)} \quad (4)$$

où :

- s = section transversale de l'orifice, en mètres carrés,
- l = longueur de l'orifice, en mètres,
- v = volume de la cavité, en mètres cubes.

Normalement, ces dispositifs résonants ont une absorption maximale à leur fréquence de résonance, comme le montrent les figures 3 et 4.

Temps de réverbération

Le temps de réverbération peut être lié au volume et à l'absorption acoustique totale d'un local par l'équation de Sabine.

$$RT = 0{,}161\ V / (\alpha \cdot S + 4mV) \qquad (5)$$

où :

V = volume du local en mètres cubes,
α = coefficient d'absorption moyen,
S = surface totale de la salle, en mètres carrés,
m = constante d'atténuation de l'énergie par mètre due à l'absorption de l'air. Les valeurs de 4 m à 20 °C sont données dans le tableau ci-dessous pour diverses combinaisons de l'humidité relative et de la fréquence. Aux basses fréquences, on peut négliger l'absorption de l'air et considérer que m est égal à zéro.

Tableau A-1 Valeurs de 4 m, soit quatre fois l'atténuation de l'énergie due à l'absorption de l'air, à 20 °C.

Humidité relative, %	Fréquence, Hz		
	2000	4000	8000
30	0,0119	0,0379	0,136
50	0,0096	0,0244	0,086
70	0,0085	0,0213	0,060

Transmission du son à travers les éléments du bâtiment

J.D. Quirt

Introduction

Pour fortement réduire le bruit transmis d'une pièce à l'autre, il faut que le mur ou le plancher séparant les deux pièces ne transmette qu'une fraction infime de l'énergie sonore incidente. Le rapport entre l'énergie sonore incidente et l'énergie sonore transmise, exprimé en décibels, est appelé la perte de transmission (Transmission loss, TL). Une transmission moindre d'énergie sonore équivaut à une perte de transmission plus élevée. Dans des applications courantes, on peut vouloir une perte de transmission de 30 à 70 dB, ce qui correspond à une transmission de l'énergie sonore variant entre 0,1 % et 0,00001 %. De telles réductions ne peuvent être réalisées à moins que les fissures et les trous ne soient soigneusement étanchés; si l'air peut passer d'une pièce à l'autre, il en est de même pour le son. Dans le présent exposé (sauf dans la section des portes), on suppose que toutes les fuites d'air ont été éliminées.

Dans le cas de cloisons ordinaires, la perte de transmission est beaucoup plus faible pour les sons de basse fréquence que pour les sons de haute fréquence. L'indice de transmission du son (Sound transmission class, STC) est le plus couramment utilisé pour comparer les différentes constructions, car il s'agit d'une échelle d'évaluation unique qui met en perspective la performance à toutes les fréquences. Pour des sons tels que la voix, le STC permet une évaluation précise de la réduction du bruit perçu. Cependant, lorsque le son contient beaucoup de basses fréquences (bruit de ventilateur ou musique avec une forte basse), la réduction réelle du bruit peut être notablement inférieure à ce que le SCT indiquerait. Malgré cet inconvénient, le STC est utilisé comme principale échelle d'évaluation dans le présent exposé car il est largement employé par les concepteurs. Le problème additionnel des basses fréquences y est par ailleurs examiné à maintes reprises.

Cet exposé commence avec une étude des facteurs fondamentaux qui déterminent la transmission du son à travers un élément quelconque d'un bâtiment. Une bonne compréhension des principes fondamentaux peut permettre de réduire le travail de conception et d'éviter les erreurs. Des changements mineurs dans la disposition des matériaux peuvent se traduire par de grandes variations dans la réduction du bruit, avec peu ou pas de frais additionnels. Les sections subséquentes portent sur les éléments spéciaux qui modifient la performance des murs, des fenêtres, des portes et des planchers types en matière de réduction du bruit.

Loi de masse

La première variable que l'on prend normalement en considération lorsqu'on veut prévoir la transmission du son à travers un panneau est sa masse surfacique. Une augmentation de la masse se traduit en général par une augmentation de la perte de transmission, car plus le panneau est lourd, moins il vibre sous l'effet des ondes sonores et, partant, moins il rayonne d'énergie sonore de l'autre côté du panneau.

La loi de masse est une règle théorique qui s'applique à des panneaux minces constitués de matériaux de construction très courants et ce, dans une gamme de fréquences limitée. Selon la loi de masse, la perte de transmission s'accroît d'environ 6 dB chaque fois que double la masse surfacique ou la fréquence (figure 1). On peut augmenter la masse en augmentant l'épaisseur du matériau ou en choisissant un matériau plus dense. Le tableau 1 donne la masse surfacique correspondant à une épaisseur de 1 mm de certains matériaux de construction courants. Pour

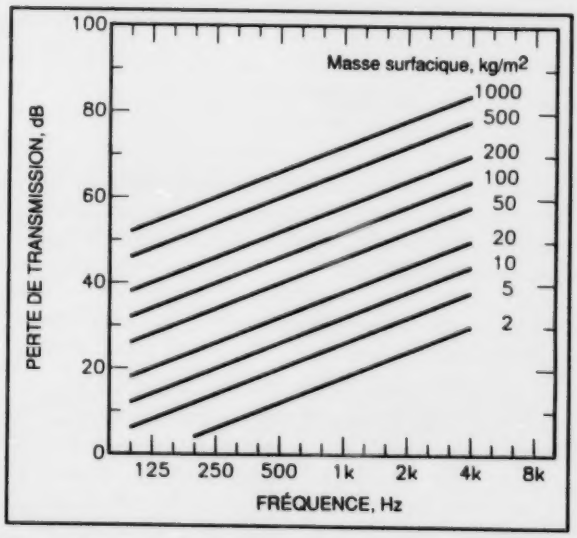

Figure 1

Tableau 1 Masse surfacique correspondant à une épaisseur de 1 mm et à une constante A (pour le calcul de la fréquence de coïncidence) de certains matériaux de construction courants.

Matériau	Masse surfacique kg/m² par mm d'épaisseur	Constante A Hz • mm
Aluminium	2,7	12 900
Béton plein, coulé	2,3	18 700
Bloc de béton creux	1,1	20 900
Sapin	0,55	8 900
Verre	2,5	15 200
Plomb	11,0	55 000
Plexiglas ou Lucite	1,15	30 800
Acier	7,7	12 700
Plaque de plâtre	0,8	39 000
Contreplaqué	0,6	21 700

obtenir la masse surfacique globale, il faut multiplier ces valeurs par l'épaisseur totale du matériau. La perte de transmission à une fréquence donnée peut alors être déterminée à partir de la figure 1 ou à l'aide de l'équation suivante :

$$TL = 20 \log (mf) - 48$$

où :

TL = perte de transmission (dB),
m = masse surfacique (kg/m²),
f = fréquence (Hz).

En principe, tous les problèmes de transmission du son pourraient être résolus si l'on augmentait la masse de la cloison; cependant, des considérations d'ordre pratique limitent cette possibilité.

Creux de coïncidence

La perte de transmission réelle diffère souvent de la perte de transmission déterminée théoriquement à l'aide de la loi de masse. La figure 2 illustre la perte de transmission type de certains matériaux courants. Comme on pouvait le prévoir en raison de sa grande masse, la dalle de béton permet un isolement supérieur à celui d'une plaque de plâtre ou du contreplaqué. Cependant, ces trois matériaux présentent des écarts importants avec la loi de masse.

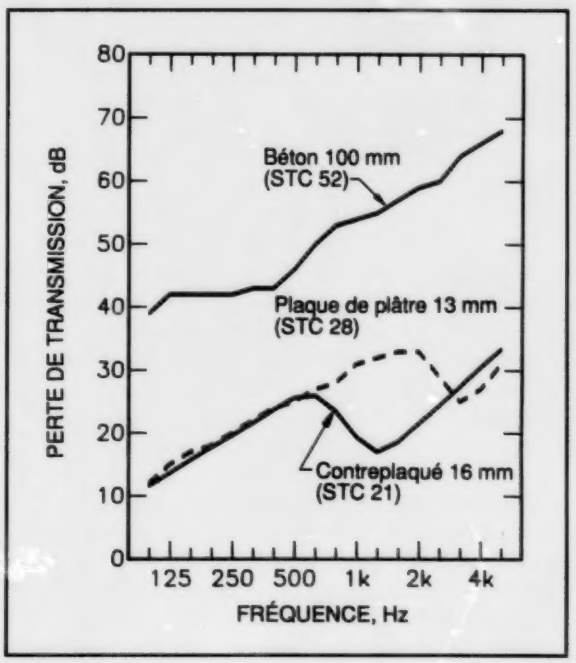

Figure 2

Les courbes correspondant à la plaque de plâtre et au contreplaqué (masse surfacique d'environ 10 kg/m^2 dans les deux cas) montrent des pertes de transmission très similaires à basse fréquence, qui augmentent avec régularité, conformément à la loi de masse. À des fréquences plus élevées, chaque courbe présente un creux appréciable, appelé creux de coïncidence. Ce creux se produit à une fréquence dite de coïncidence, qui dépend de la rigidité du matériau et de son épaisseur. Le creux de coïncidence du contreplaqué se produit à une fréquence inférieure à celle de la plaque de plâtre, car le contreplaqué est plus rigide. Bien que les deux matériaux aient la même masse, le contreplaqué a un STC inférieur en raison de ce creux.

On calcule la fréquence de coïncidence pour les matériaux de construction indiqués au tableau 1 en divisant la constante A par l'épaisseur en mm. Par exemple, puisque le béton a une constante A de 18 700, une couche de béton de 100 mm d'épaisseur aurait une fréquence de coïncidence aux environs de 190 Hz. Les valeurs de TL (figure 2) sont inférieures à celles déterminées par la loi de masse pour toutes les fréquences supérieures à la fréquence de coïncidence.

L'effet de coïncidence se fait fortement sentir avec le béton et le contreplaqué d'égales épaisseurs, car la fréquence de coïncidence a tendance à se trouver dans la gamme de fréquences importante en acoustique du bâtiment (80 à 4000 Hz). Pour un panneau flexible tel qu'une mince plaque de métal, la perte de transmission continue d'augmenter régulièrement dans toute la gamme de fréquences puisque le creux de coïncidence se situe bien au-dessus de 4000 Hz. Des matériaux "mous" tels que de fines plaques de plomb ou de plastique ne présentent pas de creux de coïncidence appréciable. Heureusement, il est possible en général d'éviter des problèmes importants dus à la coïncidence en utilisant correctement des matériaux moins coûteux.

La profondeur et la largeur du creux de coincidence sont fixées par les pertes d'énergie sonore dans le matériau et par le transfert d'énergie à la structure porteuse. Plus ces pertes sont élevées, plus le creux de coïncidence est large et peu profond, et moins il a d'effet sur le STC. Lorsque deux couches de matériau tel que des plaques de plâtre sont collées fermement ensemble, elles se comportent comme une seule couche épaisse et leur fréquence de coïncidence est donc moins élevée. Cependant, si les couches sont assemblées de façon plus lâche (avec des vis, par exemple), de sorte que la surface puisse glisser pendant les flexions, le creux de coïncidence ne peut se déplacer vers une fréquence inférieure; le frottement entre les couches peut accroître les pertes d'énergie et permettre une perte de transmission plus élevée près de la coïncidence. Pour la même raison, le verre feuilleté comportant de fines couches de plastique approprié entre les couches de verre peut présenter un STC beaucoup plus élevé que celui du verre solide de même épaisseur.

Les cloisons à double paroi

Les cloisons comportant deux ou plusieurs parois séparées par des lames d'air permettent d'obtenir des STC élevés avec des structures légères. Cependant, cette augmentation possible de perte de transmission peut être entravée par le couplage structural des parois; le transfert de vibrations à travers la structure est l'équivalent en acoustique d'un court-circuit électrique. La perte de transmission d'une construction à double paroi dépend fortement des caractéristiques de l'espace entre les parois.

Une cloison à double paroi idéale n'aurait aucune liaison mécanique entre les parois. Le son, en frappant la cloison, provoque des vibrations de la paroi exposée. Cette dernière transmet une partie de son énergie vibratoire à l'air contenu dans l'espace, qui transmet une partie de son énergie vibratoire à la seconde paroi qui rayonne à son tour une partie de cette énergie dans la pièce située de l'autre côté. Étant donné que seulement une fraction de l'énergie sonore est transmise chaque fois, la cloison à double paroi permet une plus grande réduction du bruit.

En général, plus la lame d'air entre les deux parois est profonde, plus la perte de transmission est élevée et ce, dans toute la gamme de fréquences. Les données de la figure 3 illustrent ce résultat pour deux vitrages doubles comportant des lames d'air différentes. On observerait une perte de transmission semblable avec d'autres matériaux tels que les plaques de plâtre ayant les mêmes lames d'air. Puisque la perte de transmission augmente avec la profondeur de la lame entre les deux parois, il est préférable de laisser un vide aussi grand que possible.

Résonance masse–air–masse

Il existe une raison pratique pour laisser une lame d'air minimale entre deux parois. La courbe inférieure de la figure 3 (pour une lame d'air de 6 mm) présente un creux prononcé à des fréquences juste en-dessous de 500 Hz. Ce creux est dû à la résonance masse–air–masse : l'air enfermé dans le vide entre les parois agit comme un ressort qui transfère l'énergie vibratoire d'une paroi à l'autre. Ce transfert d'énergie revêt une importance seulement dans une gamme de fréquences peu étendue où il entraîne une baisse abrupte de perte de transmission.

L'effet de cette résonance est illustré à la figure 4 où la perte de transmission d'un simple vitrage de 3 mm est comparée à la perte de transmission (donnée à la figure 3) d'un double vitrage comportant une lame d'air de 6 mm. Près de la fréquence de résonance (250 à 500 Hz), la perte de transmission du double vitrage est en fait inférieure à celle d'une paroi simple du même verre. À des fréquences inférieures, le double vitrage a une perte de transmission plus élevée, car la masse de verre a doublé; on obtiendrait essentiellement le même résultat en collant les deux parois de verre. C'est seulement à des fréquences bien supérieures à la fréquence de résonance que la lame d'air entre les deux parois devient acoustiquement importante. (Les creux observés à environ 4000 Hz sont dus à la coïncidence et non à la résonance masse–air–masse.)

La fréquence de résonance masse–air–masse dépend de la masse des parois et de la distance entre ces parois. Plus la lame d'air est profonde ou plus les matériaux sont lourds, plus la fréquence de résonance est basse. La fréquence de résonance masse–air–masse (f_{mam}) peut être calculée à partir de l'équation suivante:

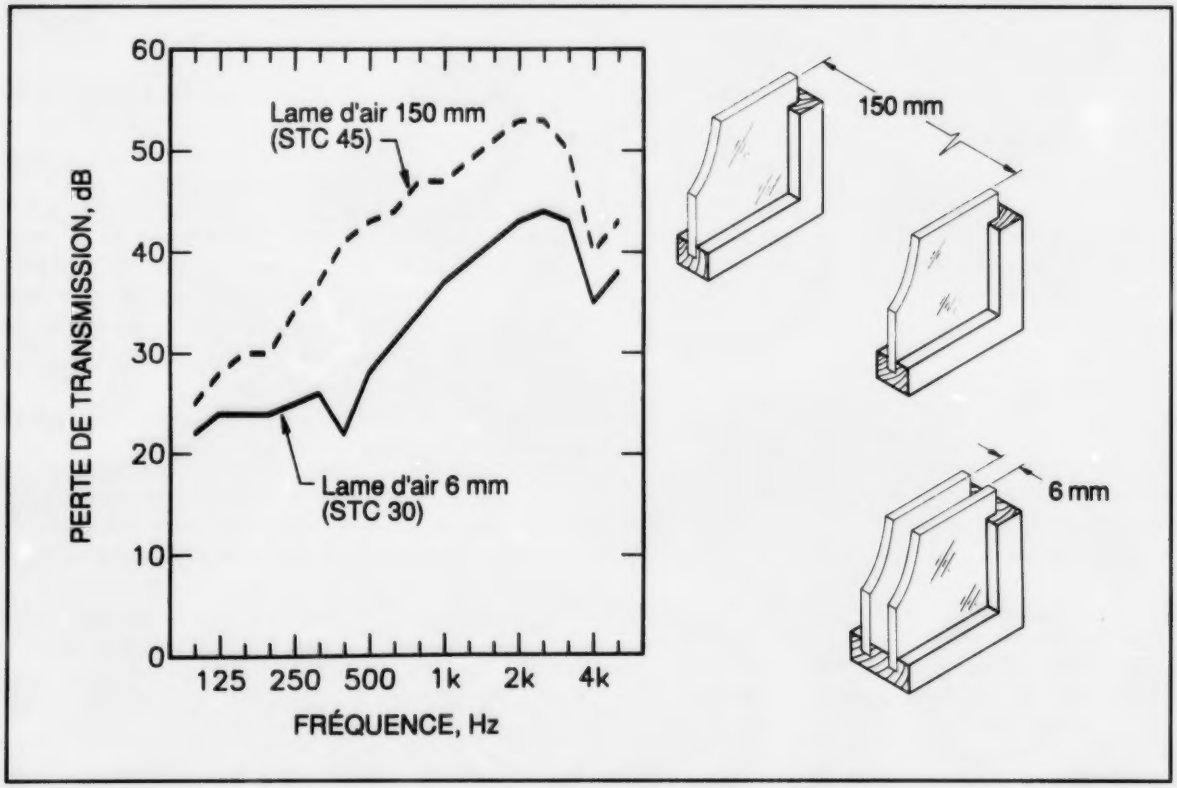

Figure 3

$$f_{mam} = 1900 \sqrt{(m_1 + m_2) / dm_1m_2}$$

où :

f_{mam} = fréquence de résonance masse–air–masse,
m_1 = masse surfacique de la première paroi (kg/m^2),
m_2 = masse surfacique de la seconde paroi (kg/m^2),
d = distance entre les parois (mm).

Pour accroître au maximum la perte de transmission due à la lame d'air, les cloisons doivent être conçues de façon que la résonance masse–air–masse se produise à une fréquence aussi basse que possible. En règle générale, une résonance masse–air–masse de 80 Hz permet une utilisation optimale des matériaux formant les murs ou le plancher. Un grand nombre de cloisons courantes ne satisfont pas ce critère. Il est très facile d'en montrer la faible perte de transmission à basse fréquence en faisant fonctionner un système stéréo dans la pièce adjacente : on entend à peine la mélodie, mais l'accompagnement résonne sourdement.

On peut augmenter notablement la perte de transmission en remplissant la cavité avec un matériau absorbant, surtout lorsqu'elle est profonde. Bien entendu, cela ne convient pas pour les fenêtres puisque les nattes absorbantes ne sont pas transparentes, mais cette méthode est couramment utilisée pour réduire la transmission du son à travers les murs ou les planchers. La densité du matériau absorbant compte peu et l'utilisation de nattes dont l'épaisseur est supérieure aux deux tiers de la profondeur de la cavité n'accroît pratiquement pas le STC. Les matériaux utilisés pour l'isolation thermique tels que la fibre de cellulose, la fibre de verre ou la laine minérale conviennent très bien.

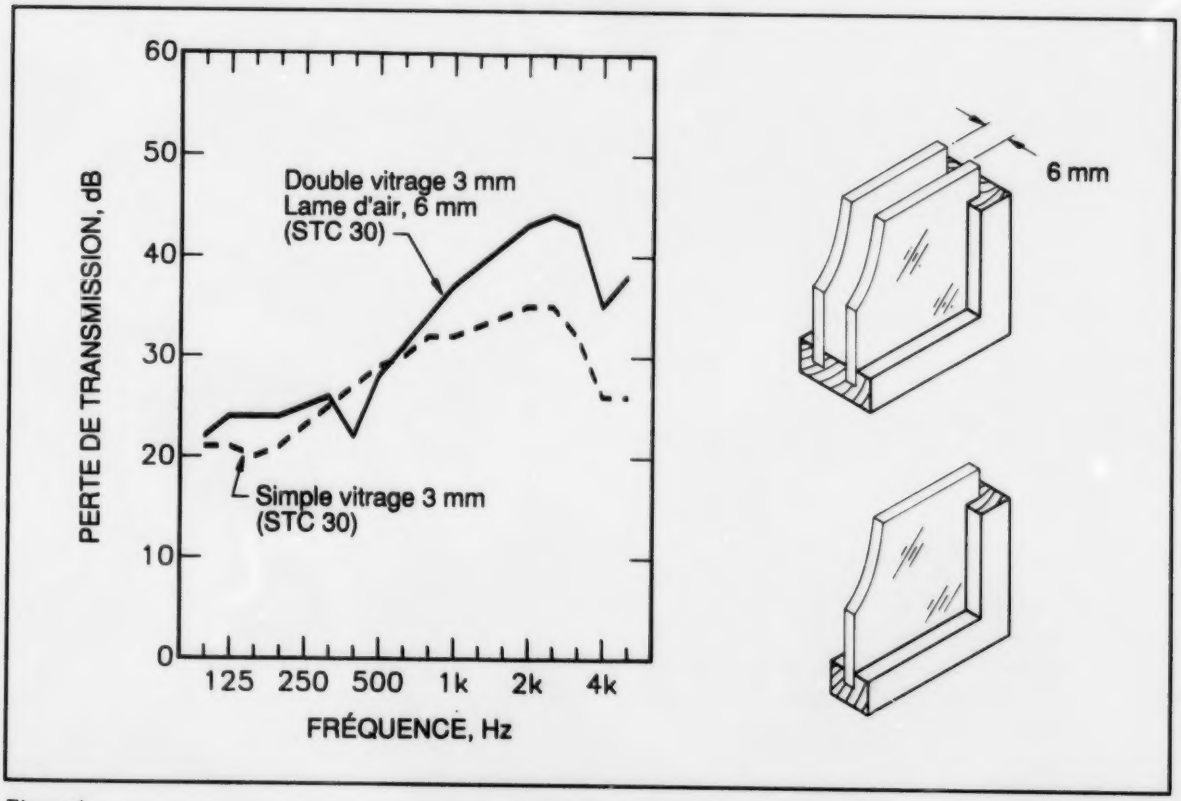

Figure 4

L'ajout d'un matériau absorbant dans la cavité présente un avantage seulement si les liaisons mécaniques entre les surfaces transmettent peu d'énergie vibratoire. Par exemple, on n'apportera guère d'amélioration en posant de la fibre de verre entre les poteaux d'un mur commun (mur à ossature de bois avec des plaques de plâtre fixées directement de chaque côté des poteaux) car la voie principale de transmission des vibrations, c'est-à-dire les poteaux, n'est pas modifiée. La figure 5 compare la perte de transmission d'un mur à ossature de bois classique avec celle d'un mur où les deux plaques de plâtre sont fixées du même côté des poteaux, sans lame d'air. On remarque alors, puisque la transmission des vibrations se fait principalement par les poteaux, que la lame d'air entre les deux plaques de plâtre apporte également peu d'amélioration. Aux basses fréquences, la cavité amoindrit en fait la perte de transmission en raison de la résonance masse–air–masse.

Cloisons particulières

Il existe plusieurs façons pratiques de réduire les liaisons mécaniques entre les parois d'une construction en plaques de plâtre : poteaux de bois en quinconce, rangées distinctes de poteaux de bois ou d'acier ou, avec une seule rangée de poteaux de bois, profilés résilients pour soutenir les parois du mur séparément les unes des autres. Les poteaux d'acier non porteurs (faits en général à partir de tôles d'acier de calibre 24) sont habituellement assez résilients pour permettre un découplage mécanique adéquat entre les plaques de plâtre posées de chaque côté. Les poteaux d'acier porteurs ont aussi donné de bons résultats lorsque dotés de profilés résilients. Certaines de ces constructions sont illustrées à la figure 6.

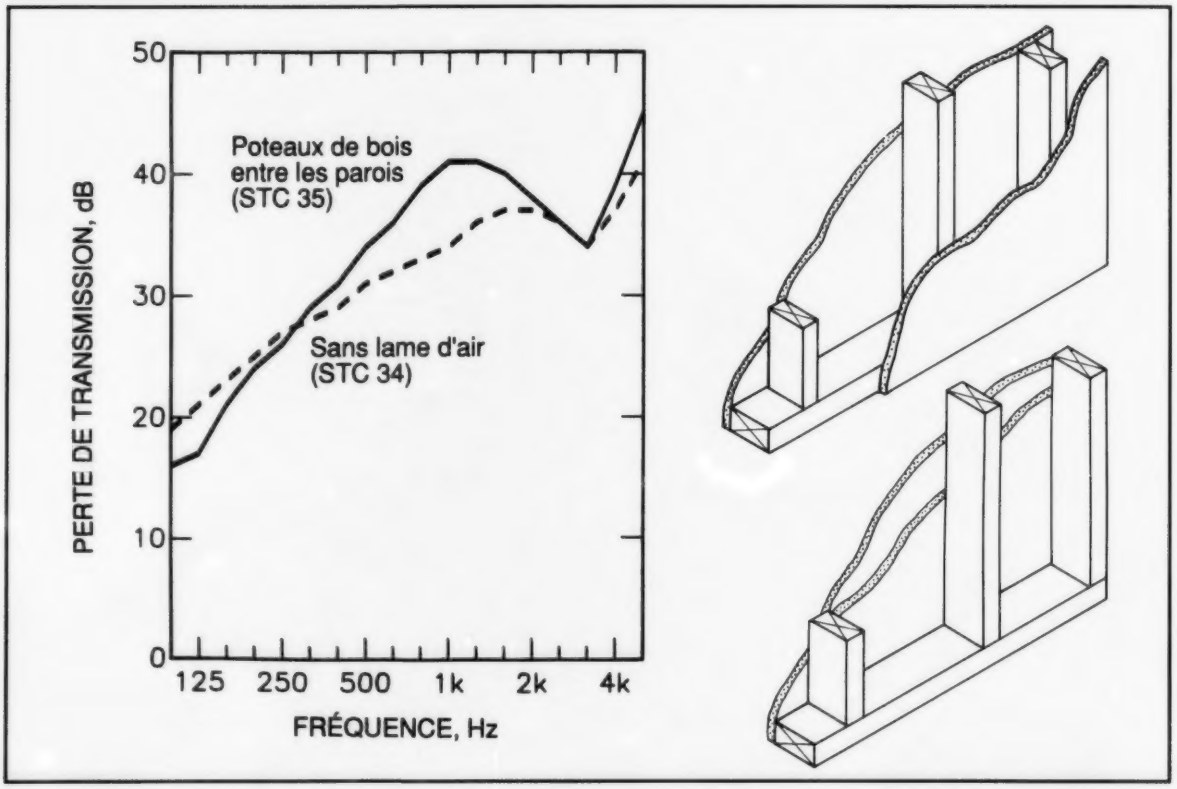

Figure 5

Le tableau 2 donne des valeurs approximatives de STC pour quelques murs en plaques de plâtre. On doit s'attendre à certains écarts avec les valeurs indiquées en raison de différences dans les types de panneaux (par exemple, matériau résistant au feu ou ordinaire), dans la fixation des plaques, dans le type et l'épaisseur du matériau absorbant et dans la rigidité des poteaux d'acier ou des profilés résilients. D'autres constructions avec des liaisons structurales minimales et une profondeur de cavité semblable donneraient des pertes de transmission similaires. Lorsque le tableau 2 mentionne deux plaques de plâtre, on suppose que les plaques sont vissées. Si des profilés résilients étaient utilisés entre deux plaques de plâtre, le STC serait égal ou inférieur au STC d'une construction identique à paroi simple en raison de la résonance masse–air–masse dans cette mince lame d'air.

Contrairement aux valeurs indiquées au tableau 2, la cloison intérieure commune utilisée dans les maisons unifamiliales (cloison sèche fixée directement de chaque côté des poteaux de bois) a un STC d'environ 34 (figure 5). L'ajout d'un matériau absorbant dans la cavité se traduirait par une augmentation du STC de moins de 5, car la majeure partie de l'énergie sonore est transmise par les poteaux. On pourrait fortement améliorer le STC en réduisant les liaisons mécaniques rigides entre les parois.

Une cloison dont le STC est supérieur à 50 isolera des bruits de voix, mais elle sera peut-être insuffisante pour isoler des bruits comportant beaucoup de basses fréquences. La courbe inférieure de la figure 6 représente la perte de transmission par une cloison composée d'une seule plaque de plâtre résistante au feu de 16 mm,

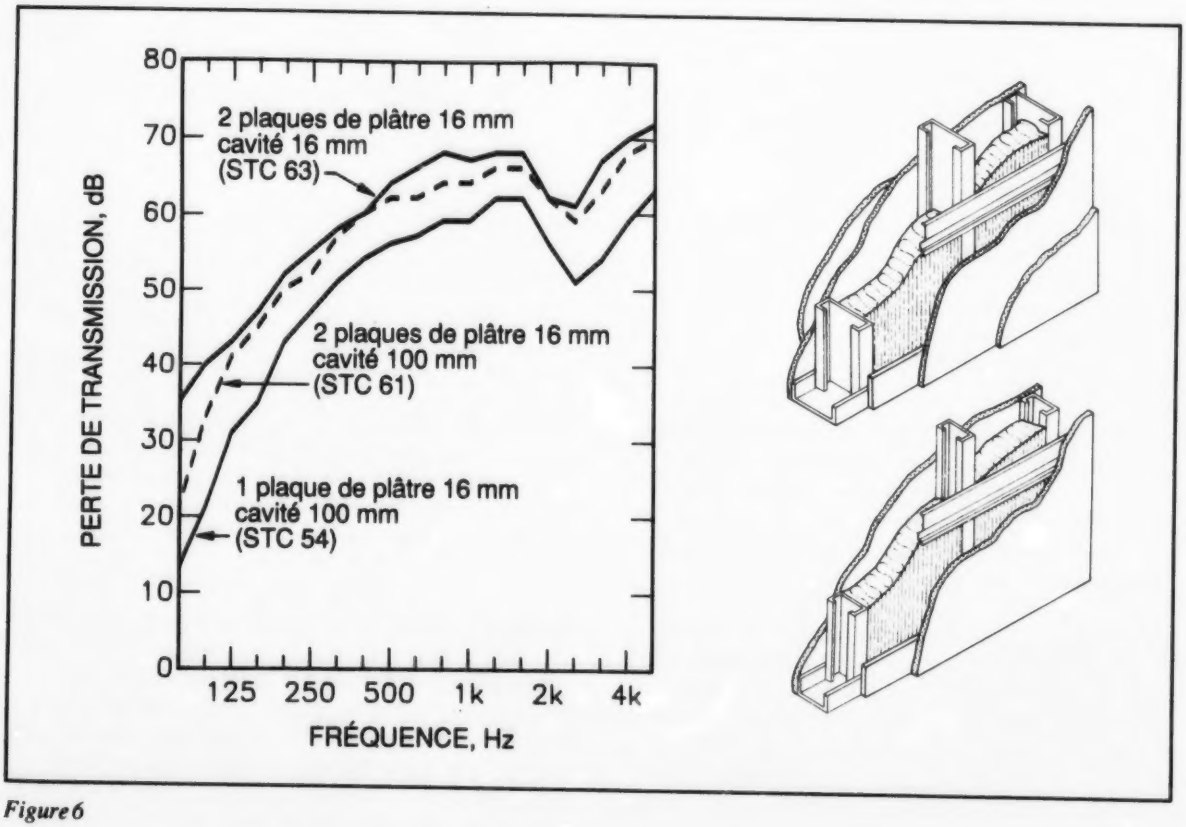

Figure 6

Tableau 2 Valeurs approximatives de STC pour des murs avec plaques de plâtre de 13 mm des deux côtés.

Support structural	Aucune absorption dans la cavité — Plaques de plâtre 1 + 1	1 + 2	2 + 2	Absorption dans la cavité — Plaques de plâtre 1 + 1	1 + 2	2 + 2
Poteaux d'acier de 90 mm, calibre 24	39	44	50	45	49	53
Poteaux de bois de 38 × 89 mm avec profilés d'acier résilients						
sur un côté	40	45	51	48	52	54
sur deux côtés	40	46	52	49	52	55
Poteaux de bois de 38 × 89 mm en en quinconce	41	47	52	50	53	55
Poteaux d'acier porteurs de 150 mm avec profilés résilients sur un côté	45	51	56	56	58	61
Poteaux de bois doubles de 38 × 89 mm avec espace de 25 mm entre eux	46	52	57	57	60	63

soutenue par des poteaux d'acier structuraux de 90 mm avec des profilés résilients de 10 mm sur un côté; le STC est 54. Aux plus basses fréquences, la perte de transmission tombe rapidement en raison de la résonance masse–air–masse; c'est pourquoi les sons graves seront relativement bien transmis.

Pour avoir une perte de transmission plus élevée, il est nécessaire d'augmenter le poids des parois superficielles ou la distance entre elles, ou les deux. L'ajout d'une seconde plaque de plâtre identique de chaque côté accroît le STC à 61 (figure 6) et la chute brutale de la perte de transmission près de 100 Hz est décalée vers les basses fréquences. Si l'on augmente la profondeur de la cavité (en remplaçant les poteaux de 90 mm par des poteaux de 150 mm), on obtient un STC encore plus élevé et on améliore considérablement la perte de transmission aux fréquences plus basses. Aux fréquences moyennes et élevées, la transmission des vibrations par les poteaux limite cette amélioration due à l'élargissement de la cavité.

La figure 7 compare la performance du meilleur panneau de la figure 6 avec la perte de transmission d'une cloison à double ossature de bois. La cavité légèrement plus profonde et la réduction des liaisons structurales grâce à la double ossature de bois se traduisent par un même STC avec des parois plus légères (la masse d'une plaque de plâtre classique de 12 mm est inférieure d'environ 30 % à celle d'une plaque de plâtre résistante au feu de 16 mm).

L'emploi de plaques de plâtre plus lourdes fixées à une double ossature de bois donnerait encore de meilleurs résultats.

Lorsqu'on conçoit un mur, il ne faut pas oublier l'importance des lames d'air profondes. Même si l'on accroît généralement la perte de transmission d'un mur en augmentant le poids de ce dernier, l'ajout d'une paroi au mauvais endroit peut amoindrir l'efficacité de la cavité et, partant, réduire la perte de transmission. Par exemple, en ajoutant une plaque de plâtre à la face intérieure d'une rangée de poteaux au milieu du mur à double ossature illustré à la figure 7, on réduirait le STC à environ 55; en ajoutant une plaque de plâtre à la face intérieure des deux rangées de poteaux, on réduirait le STC à une valeur inférieure à 45.

Les murs en maçonnerie peuvent présenter un STC élevé et avoir une bonne performance à basse fréquence s'ils sont correctement conçus et construits (figure 8). Des blocs de béton ou encore du béton précoulé ou coulé sur place de même poids ont une performance similaire. Outre l'élimination de tous les trous dans le béton ou le mortier, la maîtrise de la résonance masse–air–masse peut être un facteur important pour l'obtention d'une bonne performance. Les murs en blocs de béton sont généralement recouverts d'un panneau de finition de chaque côté; si la lame d'air à l'arrière du panneau est trop mince, la perte de transmission peut être inférieure à celle du mur sans revêtement de finition. Une réduction de la perte de transmission à basse fréquence causée par la résonance masse–air–masse donne souvent lieu à une réduction du STC d'un mur en blocs de béton qui,

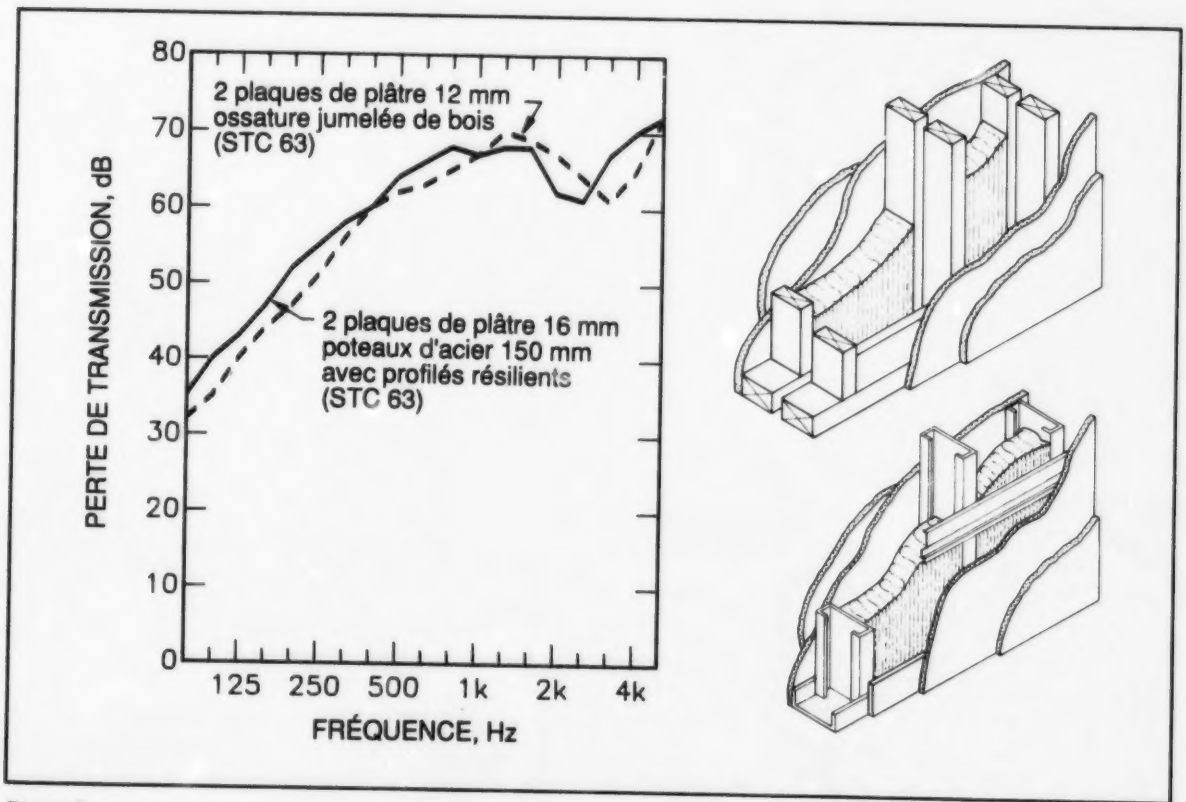

Figure 7

autrement, aurait une bonne performance. Lorsque le panneau est fixé avec des attaches résilientes (ce qui élargit la cavité et réduit les liaisons rigides comme à la figure 8), et qu'un matériau absorbant est placé entre le béton et le panneau, on accroît alors la perte de transmission et on peut obtenir des valeurs STC supérieures à 60.

Pour que la résonance masse–air–masse soit inférieure à 80 Hz, la lame d'air entre une seule épaisseur de panneau et le bloc de béton doit être d'au moins 60 mm; pour une double épaisseur de panneaux, la lame d'air peut être réduite à 35 mm. Ces lames d'air sont plus profondes que celles dans les murs de blocs de béton ordinaires, où des fourrures de bois étroites sont souvent employées pour fixer le revêtement. Lorsque les panneaux sont fixés avec de la colle, il y a aussi présence d'un mince film d'air; la résonance résultante se traduit par une perte de transmission plus faible dans la gamme 100 – 400 Hz. La porosité de certains blocs de béton peut accroître l'épaisseur réelle de la lame d'air à l'arrière du panneau; la résonance masse–air–masse se produit alors à une fréquence inférieure à la fréquence prévue d'après les dimensions physiques apparentes. Cependant, il ne faut pas compter sur cet effet à moins que des mesures effectuées avec des matériaux identiques aient montré que ce type de mur sera adéquat.

Fenêtres

La transmission acoustique à travers les fenêtres est régie par les mêmes principes physiques que ceux qui s'appliquent aux murs. Les mesures pratiques de lutte contre le bruit dépendent des propriétés du verre ainsi que des caractéristiques de l'assemblage de la fenêtre.

Une augmentation de l'épaisseur du verre réduit davantage le bruit à certaines fréquences, mais le creux de coïncidence causé par la rigidité du verre limite cet effet.

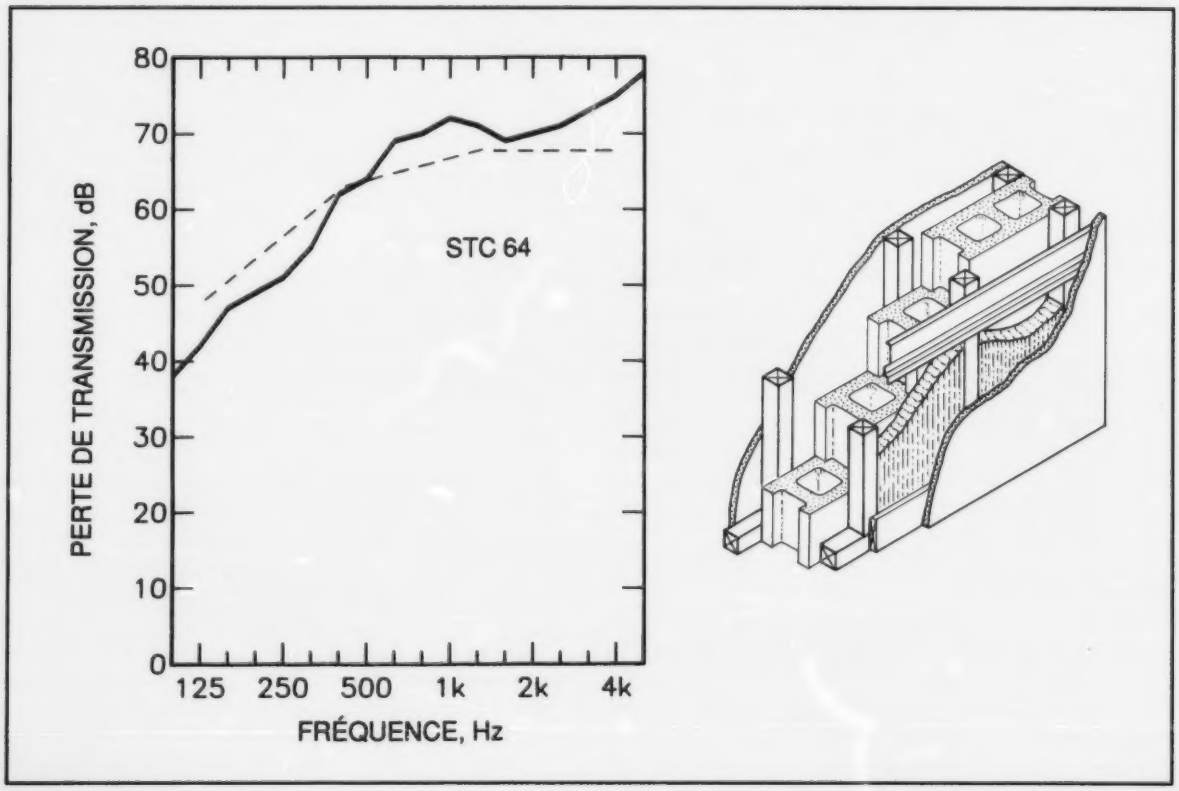

Figure 8

Pour un verre de 2 mm, le creux de coïncidence se situe près de 5000 Hz; pour un verre de 18 mm, le creux est près de 500 Hz. Ce glissement du creux de coïncidence vers les fréquences moyennes ne produit qu'une légère augmentation du STC en dépit de l'épaisseur accrue du verre plein. Si l'on désire un STC bien au-dessus de 30, une couche unique de verre plein ne convient pas.

Le verre feuilleté (deux ou plusieurs feuilles de verre collées ensemble par de minces films de plastique) peut fournir une perte de transmission très supérieure à celle du verre plein à des fréquences proches de la fréquence de coïncidence. Cette amélioration est attribuable à l'amortissement (dissipation de l'énergie vibratoire) par les films intermédiaires de plastique. Cependant, l'amortissement est normalement fonction de la température et, avec les températures habituelles des hivers canadiens, la perte de transmission améliorée grâce à l'utilisation du verre feuilletée peut être nettement réduite.

L'emploi d'un vitrage double ou triple peut aussi accroître la perte de transmission à certaines fréquences, mais l'amélioration dépend de l'espace laissée entre les parois. Comme le montrent les figures 3 et 4, la résonance masse–air–masse entraîne un creux important dans la perte de transmission aux basses ou moyennes fréquences. Avec les doubles vitrages types scellés en usine, cette résonance se produit entre 200 et 400 Hz. En augmentant l'épaisseur de la lame d'air et en utilisant un verre plus lourd, il est possible de déplacer la fréquence de résonance vers des fréquences inférieures à la gamme qui nous intéresse.

La figure 9 donne des valeurs typiques STC en fonction de la lame d'air entre les deux parois de verre; chaque fois

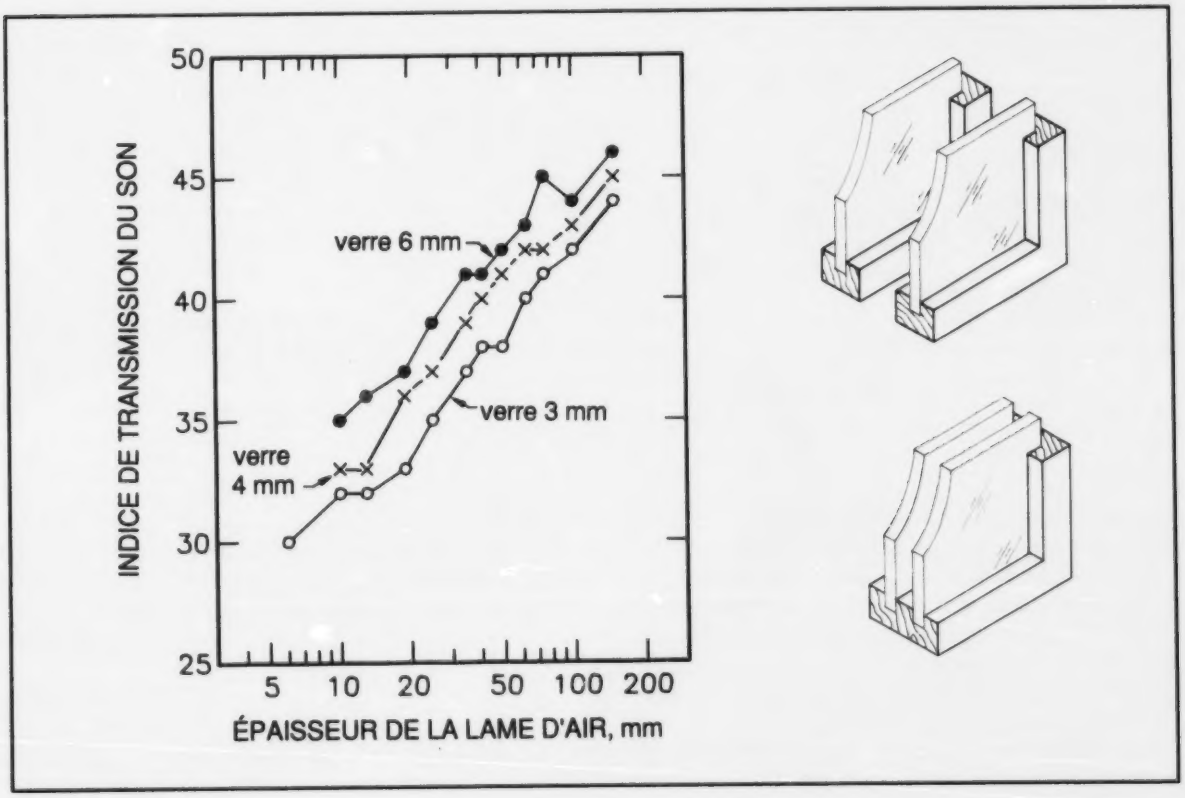

Figure 9

que double l'épaisseur de la lame d'air, le STC augmente d'environ 3. Ces valeurs s'appliquent à des fenêtres scellées; pour les fenêtres ouvrantes munies de coupe-froid, les valeurs STC sont ordinairement inférieures de 3 à 5 unités. Les fenêtres doubles non scellées en usine ont une performance acoustique similaire à celle des fenêtres doubles scellées en usine séparées par la même épaisseur d'air. Pour obtenir à coup sûr des valeurs STC supérieures à 45, il est recommandé d'utiliser des fenêtres à haut rendement dont le dormant et le châssis de la vitre sont spécialement conçus.

La transmission de l'énergie sonore par le dormant de la fenêtre peut entraîner une réduction notable de l'isolement acoustique, surtout pour les vitrages ayant une perte de transmission élevée. Les fenêtres à dormants métalliques légers, qu'il faudrait en général éviter, tendent à avoir des valeurs STC plus faibles que celles données à la figure 9, apparemment en raison des vibrations transmises par les dormants. Si l'on veut éliminer ces transmissions et obtenir un excellent isolement, il faut installer des dormants distincts soutenus par des murs structuralement indépendants.

Malgré la croyance populaire selon laquelle l'ajout d'une autre vitre améliore l'isolement acoustique, les triples vitrages assurent pratiquement le même isolement aux bruits que les doubles vitrages, à moins que la lame d'air entre les vitres soit très importante. À la figure 10, on peut comparer les valeurs de perte de transmission pour une fenêtre à double vitrage à celles d'une fenêtre à triple vitrage possédant la même épaisseur totale de lame d'air. En dessous de la fréquence de résonance masse–air–masse (environ 250 Hz dans le cas présent), la perte de transmission du triple vitrage est supérieure d'environ 3 dB, conformément à la loi de masse pour une augmentation de la masse de 50 %. À de plus hautes fréquences, les courbes sont presque identiques. Les valeurs STC pour les deux fenêtres sont les mêmes. La légère différence entre les valeurs de perte de transmission des

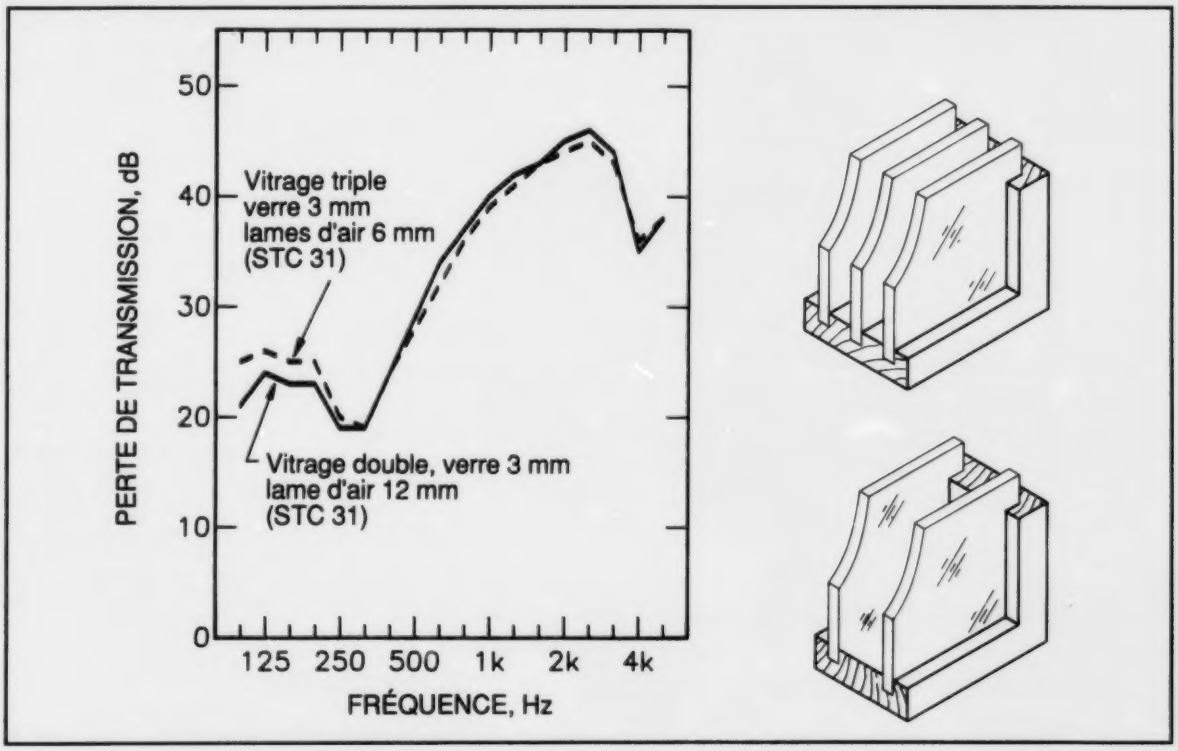

Figure 10

Tableau 3 Isolement acoustique de portes classiques

Type de porte	Masse surfacique kg/m²	STC (sans étanchéité)	STC (bonne étanchéité)
Bois à âme alvéolaire	7	17	20
Bois à âme massive	20	20	28
Acier à âme alvéolaire (cal.18)	25	20	30
Portes communiquantes (2 portes de bois à âme alvéolaire, espace de 100 mm)	7 chacune	22	26
Portes communiquantes (2 portes de bois à âme massive ou d'acier à âme alvéolaire, espace de 70 mm)	20 chacune	28	40
Portes communiquantes (2 portes de bois à âme massive ou d'acier à âme alvéolaire, espace de 70 mm avec absorbant)	20 chacune	40	44
Portes communiquantes (2 portes de bois à âme massive ou d'acier à âme alvéolaire, espace de 230 mm avec absorbant)	20 chacune	42	50

double et triple vitrages ne s'observe pas seulement avec les fenêtres dont l'épaisseur totale est faible. Sauf si l'épaisseur de *chaque* lame d'air dépasse largement 25 mm, la valeur STC pour les fenêtres à triple vitrage est très voisine de celle des fenêtres à double vitrage.

Portes

L'isolement acoustique offert par une porte dépend non seulement du type de porte mais aussi de son installation.

Le tableau 3 donne des valeurs STC pour certains types courants de portes intérieures. Les valeurs STC de la première colonne correspondent à des portes présentant des vides habituels entre le périmètre de la porte et le cadre (environ 6 mm au total en haut et en bas et 3 mm au total pour les côtés). Des espaces plus grands abaissent la valeur STC. À moins que les fuites autour de la porte soient réduites, la valeur STC réelle dépassera à peine 20, quelles que soient les améliorations apportées aux panneaux de la porte.

La courbe continue de la figure 11 illustre la perte de transmission d'une porte de bois à âme massive ordinaire non étanchée. Même si le panneau de cette porte était remplacé par du plomb massif, la valeur STC n'augmenterait pas beaucoup : le principal problème réside dans la transmission du son à travers les fissures autour de la porte.

La courbe discontinue de la figure 11 montre que l'ajout de garnitures d'étanchéité autour de la porte accroît la perte de transmission. La partie concave près de 500 Hz est le creux de coïncidence causé par la rigidité du panneau de bois massif. Les valeurs des pertes de transmission de la plupart des portes se rapprochent des valeurs de cette courbe. Les portes d'acier classiques se comportent aussi comme une paroi simple, mais leur creux de coïncidence est généralement moins abrupt. On obtient couramment des valeurs STC entre 25 et 30 pour des portes classiques en acier ou en bois massif comportant des garnitures d'étanchéité correctement installées.

Des valeurs STC typiques pour des portes munies de bonnes garnitures d'étanchéité acoustique sont données dans la dernière colonne du tableau 3. Les garnitures en caoutchouc ou en néoprène comprimés entre la porte et le cadre sont assez efficaces, mais ils peuvent gêner la fermeture de la porte. Les garnitures magnétiques (telles que celles utilisées pour les portes de réfrigérateurs) fonctionnent bien avec des portes métalliques. Si un seuil de porte plat s'impose, on peut insérer un mécanisme d'étanchéité automatique au bas de la porte, dans son épaisseur; les coupe-bise de ce dispositif doivent être bien comprimés entre le seuil et la porte lorsque celle-ci est fermée, et ils doivent bien s'adapter au bas de la porte et aux garnitures latérales pour être efficaces. S'il n'est pas soigneusement ajusté, ce dispositif d'étanchéité ne

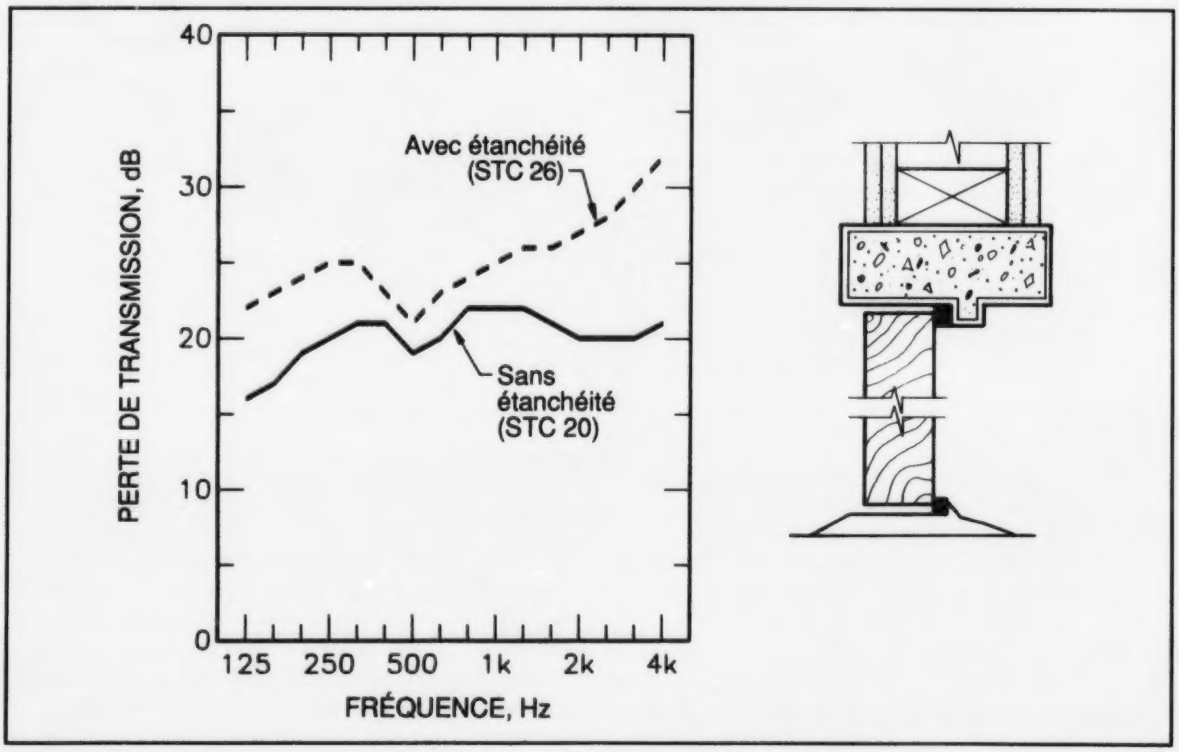

Figure 11

constitue pas une aussi bonne protection qu'une garniture comprimée ou magnétique.

Lorsqu'elles sont dotées d'une garniture acoustique adéquate, les portes simples peuvent présenter des valeurs STC égales ou supérieures à 35. De nombreux fabricants produisent des portes offrant une bonne performance acoustique avec des valeurs STC allant de 35 à plus de 50. On peut trouver des renseignements sur l'isolement acoustique de produits spécifiques dans la documentation des fabricants. L'installation est d'une importance capitale pour assurer un tel isolement; on ne peut atteindre la performance nominale si la porte n'est pas étanchée correctement et si le cadre de la porte est mal fixé au mur, avec des fissures ou des trous pouvant laisser passer les bruits. Il faudra peut-être remplacer ou réajuster périodiquement les joints d'étanchéité pour maintenir la performance acoustique de ces portes.

L'installation de portes communiquantes (deux portes séparées par un espace) constitue une solution moins coûteuse et acoustiquement plus efficace lorsqu'elles ne gênent pas l'accès. L'ajout d'un matériau absorbant entre les portes (une paroi de 25 mm sur l'une des surfaces internes, ou sur les deux) permet d'obtenir des valeurs STC de 45 ou plus (tableau 3). Lorsqu'il y a un matériau absorbant dans la cavité, l'ajustement parfait des joints autour des portes communiquantes est beaucoup moins important que dans le cas des portes simples à haute performance acoustique.

Planchers

Il existe probablement plus de variations dans la conception acoustique des planchers que dans celle des murs, car, dans la conception des planchers, il faut tenir compte à la fois des bruits d'impact et des bruits aériens.

La figure 12 représente un plancher à solives ordinaire. Qu'il s'agisse de solives pleines ou de fermes en bois, en acier ou même en béton, cela n'a pas d'importance du point de vue acoustique. La majeure partie du poids d'un plancher doit reposer sur la partie supérieure des solives. Pour que le STC dépasse sensiblement 50, la couche supérieure du plancher devrait avoir une masse surfacique d'au moins 50 kg/m^2; elle devrait ainsi comprendre au moins 25 mm de béton et une épaisseur beaucoup plus grande d'un matériau moins dense tel que le contreplaqué.

La transmission de l'énergie sonore à travers les liaisons structurales qui relient les surfaces du plancher à celles du plafond en dessous limite la réduction du bruit pour plusieurs planchers. On pourrait remédier à ce problème en installant des solives distinctes pour soutenir le plafond, mais cette méthode est généralement rejetée car trop coûteuse. Une solution courante consiste à utiliser des profilés résilients pour fixer les plaques de plâtre à la partie inférieure des solives de plancher. La cavité entre la face inférieure du plancher et le plafond est normalement assez profonde pour que la résonance masse–air–masse soit négligeable. Si l'on évite les liaisons structurales rigides entre les surfaces, l'ajout d'un matériau absorbant dans les espaces entre les solives de plancher peut améliorer encore la perte de transmission, de la même façon qu'avec les murs au tableau 2. (Lorsqu'on veut réduire convenablement les liaisons structurales, il faut éviter de fixer une plaque de plâtre directement à la partie inférieure des solives de plancher, puis d'utiliser des profilés résilients pour soutenir une seconde plaque. En effet, la résonance masse–air–masse due à la mince lame d'air entre les plaques de plâtre amoindrit notablement la perte de transmission aux basses fréquences.)

Dans de nombreux bâtiments, la pose d'un matériau absorbant dans la cavité et d'une fixation résiliente du plafond présente peu d'avantages car l'énergie sonore est

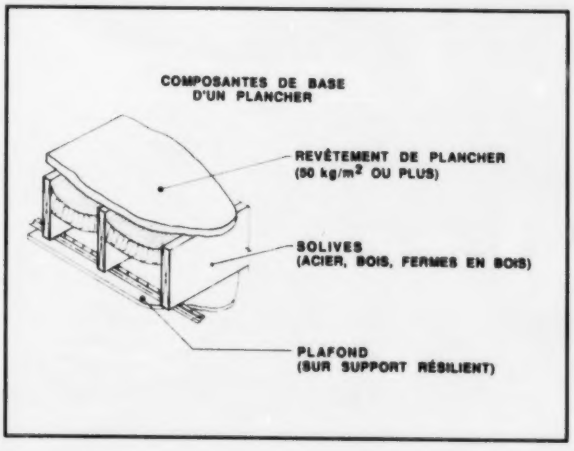

Figure 12

transmise par la structure porteuse. Une suspension résiliente du plafond en dessous du plancher ne réduit pas la transmission du bruit le long du plancher vers les pièces adjacentes au même étage, ni la transmission par les murs porteurs. L'utilisation d'un "plancher flottant" est le moyen le plus efficace de réduire le transfert d'énergie sonore à la structure. Une forme courante de plancher flottant consiste en une couche de béton soutenue par une couche résiliente ou par une fixation résiliente spéciale. Certains types de supports de planchers résilients sont illustrés à la figure 13.

La conception de planchers flottants n'est pas simple. La surface supérieure doit être assez lourde et rigide pour qu'elle bouge à peine lorsqu'on marche sur le plancher et le support résilient doit avoir une rigidité appropriée. Ces détails doivent être conçus en particulier par un spécialiste. Les planchers flottants ne sont pas bon marché, mais ils permettent de concevoir des planchers offrant une perte de transmission très élevée des bruits aériens et présentant une bonne résistance aux bruits d'impact (voir ci-dessous).

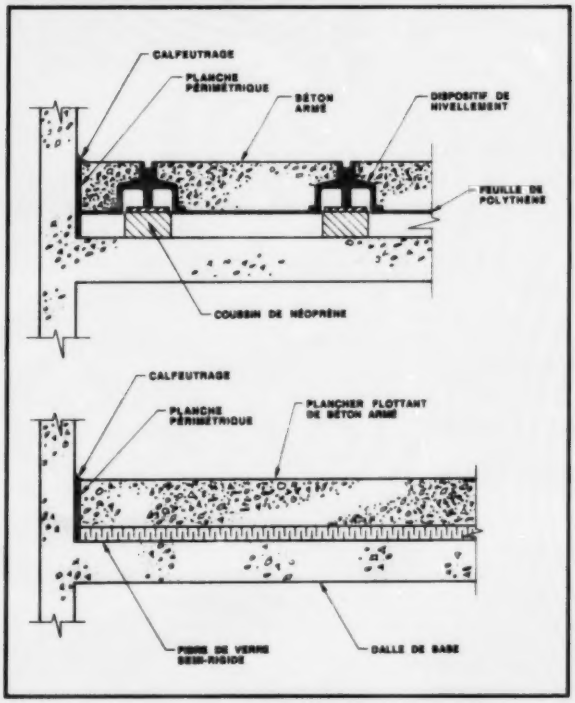

Figure 13

Lutte contre les bruits d'impact

Les bruits d'impact, notamment les bruits de pas, constituent l'une des formes d'énergie sonore les plus difficiles à maîtriser. Lorsqu'une onde sonore aérienne frappe un mur, seule une petite partie de son énergie sonore est transférée au mur. Lorsqu'un objet solide frappe un plancher ou un mur, le transfert d'énergie est beaucoup plus complet.

Les paramètres physiques qui régissent la transmission d'un bruit d'impact à travers un plancher sont fondamentalement les mêmes que dans le cas des bruits aériens. Les planchers légers entrent facilement en vibration et résonnent à de basses fréquences; lorsqu'on marche sur ces planchers, ils émettent des bruits gênants. En augmentant la masse des diverses couches, on réduit la réponse du plancher aux chocs et, partant, le son transmis.

La division d'un plancher en deux couches isolées ou reliées par des supports résilients réduit la transmission des vibrations entre les couches et, par conséquent, le rayonnement des bruits d'impact et des bruits aériens de l'autre côté. L'ajout d'un matériau absorbant dans les cavités d'un plancher correctement isolé présente les mêmes avantages pour les bruits d'impact que pour les bruits aériens (voir ci-dessus).

Une autre façon de réduire la transmission des bruits d'impact, inopérante avec les bruits aériens, consiste à poser sur le plancher une couche résiliente molle, telle qu'un tapis. La force du choc est amortie par la couche résiliente, ce qui réduit l'énergie vibratoire transmise à la structure du plancher. Par exemple, lorsqu'on pose un tapis et un sous-tapis sur une dalle de béton de 150 mm, l'indice de l'isolement aux bruits d'impact (Impact insulation class, IIC) passe de 40 à 65 ou plus suivant le type de tapis. Par contre, l'addition d'un tapis et d'un sous-tapis a peu d'effet sur le STC d'un plancher.

Le plancher flottant permet aussi de réduire efficacement la transmission des bruits d'impact, et il remédie parfaitement à ce problème lorsque la surface supérieure doit être dure, comme dans une cuisine ou une salle de bain.

L'indice IIC sert généralement à classer les planchers selon leur efficacité à réduire la transmission des bruits d'impact. La plupart des bruits émis lorsqu'on marche

sur des planchers légers se situent à des fréquences inférieures à la gamme de fréquences utilisée pour le calcul de l'indice IIC. En outre, les sons produits par la machine à frapper normalisée employée pour mesurer l'indice IIC sont assez différents des sons produits par une personne marchant sur ce type de plancher. Certains planchers légers ont un indice IIC élevé lorsqu'on y ajoute un tapis, bien que les bruits de basse fréquence produits par des pas puissent encore être très gênants. Tant qu'un meilleur essai n'aura pas été inventé et adopté dans les codes du bâtiment, il faudra utiliser les indices IIC et tenir compte du fait que leurs valeurs sont plutôt optimistes en ce qui concerne la performance aux chocs des planchers légers.

Résumé

Lorsqu'on veut empêcher la transmission des bruits, il faut d'abord éliminer toutes les fuites. Habituellement, on considère ensuite la masse de la cloison; une augmentation du poids se traduit en général par une augmentation de la perte de transmission. Cependant, cette perte accrue de transmission est limitée par le creux de coïncidence, qui dépend de la rigidité et de l'épaisseur du matériau.

Le remplacement des constructions massives par des constructions à cavité constitue une solution pratique. La première étape consiste à réduire les liaisons structurales qui permettent le transfert de l'énergie vibratoire à travers la cavité. Puis, il faut accroître la profondeur de la cavité et y ajouter un matériau absorbant pour améliorer la perte de transmission. Cette dernière est limitée aux basses fréquences par la résonance masse–air–masse. Si cette résonance est inférieure à 80 Hz, les bruits aériens posent peu de problèmes. On peut abaisser la fréquence de résonance en augmentant la masse des couches superficielles ou en augmentant l'espace qui les sépare.

Les bruits d'impact constituent l'une des formes d'énergie sonore les plus difficiles à éliminer. En général, la méthode la plus efficace consiste à utiliser un plancher flottant ou une surface résiliente telle qu'un tapis pour réduire la transmission de l'énergie vibratoire à la structure.

L'acoustique en pratique

A.C.C. Warnock

Introduction

Lorsque la transmission du son à travers les éléments du bâtiment est déterminée en laboratoire, le son ne traverse que l'élément considéré. Dans les bâtiments, cependant, il est probable que les bruits se propageront par des voies indirectes autour des éléments de séparation. Le présent exposé traite de certains des problèmes associés à la combinaison des éléments en ensembles.

Pour créer un environnement acoustique efficace dans un bâtiment, il ne suffit pas de considérer la performance des éléments choisis. Il faut aussi tenir compte des liaisons, c'est-à-dire de la performance de l'ensemble. Il est difficile de spécifier des grandeurs dans ce domaine en raison de la complexité des problèmes et du manque d'information. La meilleure façon d'obtenir un environnement acoustique adéquat dans un bâtiment consiste à choisir des critères, à sélectionner les éléments et le plan d'assemblage pour satisfaire ces critères, puis à vérifier la performance acoustique par des essais sur le terrain le plus tôt possible au cours de la construction.

Indice de transmission du son in situ (FSTC) et indice d'isolement aux bruits d'impact in situ (FIIC)

Un certain nombre de facteurs interdépendants interviennent lorsqu'on veut déterminer si l'occupant d'un immeuble d'habitation est dérangé par le bruit des appartements voisins. Ce sont :

1) les caractéristiques de transmission des bruits d'impact et des bruits aériens des murs et des planchers,
2) le niveau de bruit produit dans les appartements voisins,
3) le niveau de bruit de fond dans le propre appartement de l'occupant, et
4) la sensibilité des occupants.

Par exemple, si le niveau de bruit de fond est suffisamment élevé, les sons importuns sont masqués et ne sont pas détectables. Les trois derniers facteurs peuvent varier considérablement et, en général, le concepteur n'a aucun pouvoir sur eux. La démarche pragmatique, dans ce cas, consiste d'une part à choisir une valeur de l'indice d'isolement aux bruits d'impact in situ (Field impact insulation class, FIIC) ou de l'indice de transmission du son in situ (Field sound transmission class, FSTC) qui protégera l'occupant dans la plupart des situations, et d'autre part à accepter les cas où la gêne est due à des voisins anormalement bruyants, à de faibles niveaux de bruit de fond ou à la sensibilité des occupants.

Les critères donnés ici s'appliquent à des pièces complètes mises à l'essai sur le terrain et non à des éléments vérifiés en laboratoire. Les valeurs obtenues en laboratoire ne s'appliquent pas aux ensembles, mais aux éléments seulement. Pour souligner que les mesures sont prises in situ, nous utilisons la lettre F (field) dans les indices respectifs.

Afin que les occupants d'immeubles d'habitation jouissent d'un degré raisonnable d'intimité acoustique, le FSTC des murs et des planchers séparant les appartements doit être d'au moins 55 dans le bâtiment terminé. Des valeurs plus élevées permettent un meilleur environnement et peuvent être obtenues avec des matériaux de construction ordinaires sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à des conceptions compliquées, mais il faut alors apporter le plus grand soin à la conception et à la construction. En Europe, on exige couramment des valeurs minimales supérieures à 50 et, dans certains pays, des essais sur le terrain garantissent que les critères sont satisfaits.

L'indice d'isolement aux bruits d'impact in situ pour un plancher de séparation dur devrait être d'au moins 55. Lorsqu'un plancher est recouvert de tapis, le FIIC final devrait être d'au moins 65, valeur relativement facile à obtenir avec un sous-tapis. Malheureusement, malgré un FIIC élevé, certains planchers légers ne sont pas satisfaisants en pratique car les pas produisent un bruit de basse fréquence. Pour des raisons techniques, les essais normalisés n'évaluent pas le comportement à basse fréquence des planchers. L'évaluation de ces planchers requiert donc une certaine expérience.

Une fois les éléments choisis, le concepteur n'a aucune garantie que la performance du bâtiment fini correspondra à celle obtenue lors des essais en laboratoire ou dans d'autres bâtiments, car les éléments de l'ensemble peuvent interagir de façon négative. Pour réussir la

construction d'un bâtiment adéquat, il convient de procéder à des essais acoustiques avant l'installation des occupants, dans un appartement du bâtiment non terminé; ces essais peuvent révéler de nombreux problèmes qui pourront alors être évités dans les appartements subséquents.

Agencement des pièces du bâtiment

Les critères acoustiques recommandés ci-dessus s'appliquent aux séparations entre des pièces courantes telles que les salles de séjour ou des chambres à coucher. Si une zone de calme telle qu'une chambre à coucher doit être placée près d'une salle de machines bruyantes, le FSTC désiré doit alors être augmenté à 65 ou plus. Dans ce cas, il est recommandé de demander l'avis d'un acousticien qualifié. Par contre, le FSTC d'un mur séparant un appartement du corridor n'a pas besoin d'être beaucoup plus élevé que 50, car les seuls bruits importuns ne seront probablement que des voix ou de la musique assourdie provenant d'un appartement voisin dont la porte est momentanément ouverte.

Ainsi, l'agencement des pièces d'un bâtiment influe considérablement sur les critères d'isolement acoustique à choisir pour les éléments et l'ensemble. L'une des mesures les plus simples pour lutter contre le bruit consiste à séparer le plus possible les sources de bruit des zones de calme. Les salles de machines, les vide-ordures, les cages d'ascenseur et autres zones bruyantes doivent être situés aussi loin que possible des salles de séjour ou des chambres à coucher. Le fait de placer des pièces relativement tranquilles, telles que des chambres à coucher, près les unes des autres aide aussi à réduire au minimum les critères d'isolement requis pour satisfaire les occupants.

À la figure 1, la chambre à coucher de l'appartement de gauche sera probablement bruyante en raison de la proximité de la cage d'ascenseur et de la cuisine. Dans l'appartement de droite, la chambre à coucher est éloignée de la cage d'ascenseur et de la cuisine et les principales sources de bruit seront les appartements au-dessus et au-dessous. Si cette disposition est utilisée pour des appartements juxtaposés, le plan doit être inversé pour faire coïncider les chambres et les salons.

Les corridors communs servent de zones tampons entre les appartements, mais les portes qui donnent sur ces corridors permettent souvent au bruit de s'introduire dans l'appartement. C'est le cas en particulier des portes mal étanchées et comportant un grand espace au bas de la porte.

À la figure 2, le bruit peut s'introduire dans les appartements non seulement à partir du corridor mais également par les portes entre les appartements adjacents. Pour réduire ce bruit, les portes qui donnent sur le corridor doivent être munies de garnitures d'étanchéité de façon à éliminer les fuites importantes susceptibles d'accroître la transmission du son.

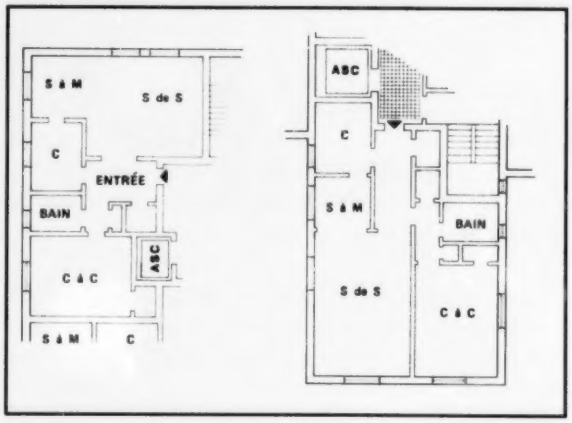

Figure 1

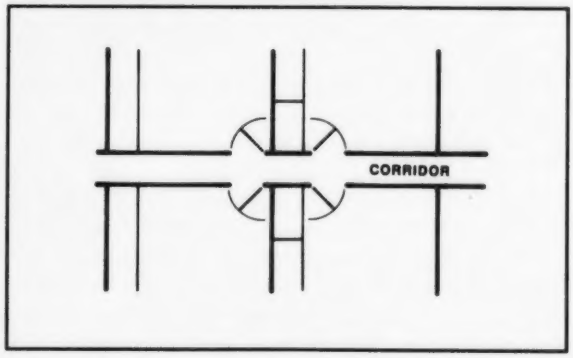

Figure 2

Un vestibule placé entre les zones d'habitation et le corridor (figure 3) aide aussi à réduire l'intrusion du bruit. Cela se fait couramment dans les hôtels européens, avec de bons résultats. Cette technique pourrait être utilisée dans un restaurant pour isoler la salle à manger des bruits de la cuisine.

Une autre façon de résoudre ce problème consiste à décaler les portes le long du corridor (figure 4) et à ajouter des matériaux absorbants sur les surfaces du corridor pour y réduire la transmission du bruit. Des matériaux absorbants peuvent facilement être ajoutés au plafond ou aux parties supérieures des murs du corridor, ou encore un tapis peut être installé sur le plancher.

Une fois l'agencement préliminaire des pièces du bâtiment choisi, il convient d'examiner les exigences acoustiques pour les murs et les planchers séparant les différentes pièces. Lorsque le plan impose des pertes de transmission très élevées pour les murs et les planchers, les pièces du bâtiment peuvent être réarrangées de façon que les exigences acoustiques soient moins restrictives.

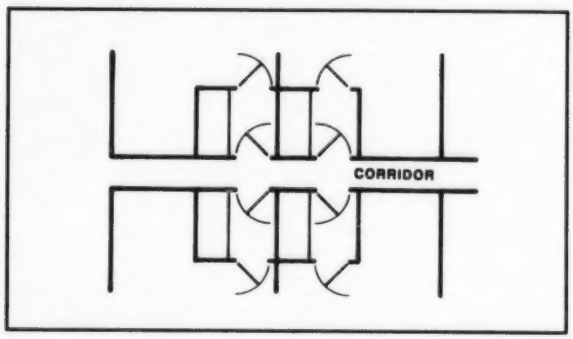

Figure 3

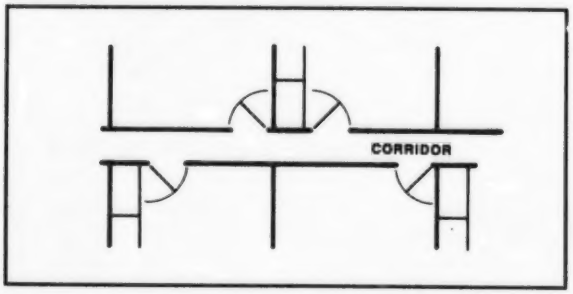

Figure 4

Transmission des ensembles à éléments multiples

Il est souvent nécessaire de combiner des murs avec d'autres éléments tels que des portes ou des fenêtres. En général, les pertes de transmission par les portes et les fenêtres ne sont pas très élevées et l'isolement acoustique global de l'ensemble se trouve réduit. Par conséquent, le problème auquel fait face le concepteur consiste à combiner deux ou plusieurs éléments ayant des surfaces et des pertes de transmission du son différentes de façon que la perte de transmission globale et l'indice de transmission du son (Sound transmission class, STC) de l'ensemble satisfassent les critères de conception.

L'énergie sonore traversant chaque élément dépend de la surface et de la perte de transmission de cet élément. La perte de transmission est fonction de la fréquence et les calculs doivent donc être effectués pour chaque bande de fréquences en jeu. Le STC est ensuite calculé pour le spectre global de pertes de transmision. Cependant, dans un premier temps, il est suffisant de travailler avec les valeurs STC.

Une feuille de calcul est donnée à la fin du présent chapitre. Une solution simpliste pour combiner les éléments consisterait à exiger que tous les éléments aient la même valeur STC. En fait, cela n'est généralement pas possible lorsque le STC requis est assez élevé et qu'il faut faire intervenir des fenêtres et des portes. Une méthode plus pratique et plus économique est de faire en sorte que les éléments plus faibles aient une petite surface et qu'ils laissent passer une plus grande quantité d'énergie sonore. On compense ensuite en réduisant l'énergie sonore qui traverse l'élément le plus fort, en général le mur.

Le tableau 1 donne un exemple de l'emploi de la feuille de calcul pour un mur, une porte et une fenêtre dont les surfaces représentent 82 %, 15 % et 3 % de la surface totale. Un bon point de départ pour la répartition de l'énergie entre les éléments consiste à supposer que chacun laisse passer la même fraction de l'énergie totale (dans le cas présent, 33 % chacun). Quelquefois, cette hypothèse ne conduit pas à un résultat satisfaisant; au tableau 1, le pourcentage d'énergie transmise à travers chaque élément est fixé à 10 %, 45 % et 45 % pour le mur, la porte et la fenêtre respectivement, les éléments

Tableau 1 Calcul des STC pour un mur, une fenêtre et une porte.

STC combiné requis (STC') = 50

Élément	Pourcentage d'énergie %	C1	Pourcentage de surface %	C2	STC de l'élément = STC' - C1 + C2
1. mur	10	-10	82	-1	59
2. porte	45	-3	15	-8	45
3. fenêtre	45	-3	3	-15	38

Tableau 2 Calcul des STC pour un mur et une porte.

STC combiné requis (STC') = 50

Élément	Pourcentage d'énergie	C1	Pourcentage de surface	C2	STC de l'élément = STC' - C1 + C2
1. mur	10	-10	85	-1	59
2. porte	90	0	15	-8	42

plus faibles laissant passer plus d'énergie. Le STC combiné requis est de 50 et les calculs montrent que la fenêtre devrait avoir un STC de 38, la porte, un STC de 45 et le mur, un STC de 59.

Le même exemple, sans la fenêtre et avec la porte laissant passer 90 % de l'énergie sonore, est présenté au tableau 2. Le mur doit encore avoir un STC de 59 et la porte un STC de 42. (Voir la Feuille de calcul, première partie.)

On ne tire aucun avantage à réduire l'énergie traversant le mur à 1 % seulement : le STC de la porte doit toujours être de 42, même si le STC du mur doit s'élever à 69. Cet écart apparent est dû à la nature logarithmique des calculs.

Il ressort de ces calculs qu'un élément peut être renforcé par rapport aux autres jusqu'à un certain point seulement. Le STC global est déterminé très rapidement par la transmission du son à travers l'élément faible. Les calculs montrent aussi qu'il est important d'examiner les exigences de l'ensemble avant la construction. Une fenêtre ayant un STC de 38 peut être construite à partir d'éléments facilement disponibles, mais des portes simples ayant un STC supérieur à 40 sont considérées comme des portes à haut rendement acoustique et peuvent être assez coûteuses. Une paire de portes pourrait être installée dans le même cadre pour donner un STC assez élevé, mais un ensemble à double porte peut ne pas être acceptable. Il serait peut-être plus économique de revoir le plan du bâtiment de façon que les exigences acoustiques de l'ensemble soient moins restrictives, par exemple en ajoutant un vestibule tampon.

Il est parfois nécessaire de commencer avec des éléments disponibles dont on connaît les surfaces et les valeurs STC, et de calculer le STC combiné afin de vérifier qu'il convient à certaines utilisations particulières. On peut utiliser à cette fin la deuxième partie de la feuille de calcul. Par exemple, un mur de 10 m^2 avec un STC de 50 combiné à une porte de 2 m^2 avec un STC de 25 donnerait un système ayant un STC de 33 (tableau 3).

Tableau 3 Calcul de l'indice de transmission du son (STC) combiné pour un mur et une porte dont les valeurs STC sont connues.

STC combiné supposé (STC') = 35

Élément	STC	Pourcentage de surface %	C2	C1 = STC'- STC + C2	Pourcentage d'énergie %
1. mur	50	84	-1	-16	2,5
2. fenêtre	25	16	-8	2	160,0

Somme des pourcentages d'énergie = 162,5

C' = 2 dB

STC réel = STC' - C' = 35 - 2 = 33
(Voir la Feuille de calcul, deuxième partie.)

Voies de transmission latérales

Lorsque des cloisons ou des planchers sont mis à l'essai dans les laboratoires d'acoustique, on prend grand soin de s'assurer que la seule voie de transmission que peut emprunter le son passe par l'échantillon qui, idéalement, est complètement isolé du reste de la structure. Les liaisons rigides entre l'échantillon et la structure environnante sont éliminées là où c'est possible, ou sont rendues suffisamment résilientes.

Pour atteindre dans des bâtiments la même atténuation acoustique que celle obtenue lors d'essais en laboratoire, il faut s'efforcer de réduire au minimum la transmission d'énergie par les voies latérales en incorporant des coupures dans la structure et des liaisons résilientes. Idéalement, chaque appartement serait une unité indépendante suspendue de façon résiliente dans le bâtiment, comme un ensemble de boîtes à l'intérieur d'une plus grande boîte.

Dans un bâtiment où tous les éléments sont reliés de façon rigide, l'énergie sonore peut être transmise à travers les plafonds, les murs et les planchers de la structure vers les pièces adjacentes : les vibrations dans la structure provoquent le rayonnement du bruit à partir de toutes les surfaces, comme le montre la figure 5. Les voies de transmission qui ne sont pas directes sont appelées voies de transmission latérales.

Lorsque le son a pénétré dans une structure et qu'il se propage sous forme de vibrations, il peut se déplacer sur des distances considérables avec seulement des pertes minimes d'énergie. La perte d'énergie dépend du matériau et des caractéristiques de construction. Les pertes aux jonctions plancher-mur peuvent être prévues pour des structures monolithiques simples telles que le béton massif, mais on peut seulement faire des estima-

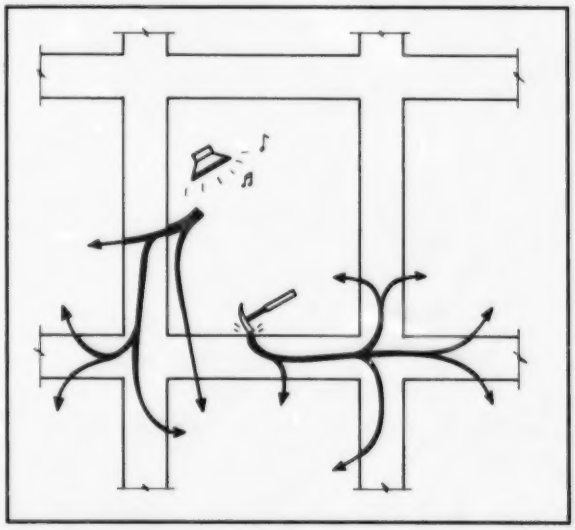

Figure 5

tions qualitatives pour des jonctions plus compliquées. Les vibrations dans le matériau rayonnent continuellement l'énergie sous forme de son des deux côtés de la surface. Ces voies de transmission ont des conséquences beaucoup plus importantes pour les bruits d'impact que pour les bruits aériens, car le transfert de l'énergie de choc à la structure peut être très efficace lorsque les surfaces ou les objets percutants sont durs.

Si, pour des raisons structurales, un plancher est lié rigidement aux murs adjacent et porteur, la transmission des bruits d'impact par les voies latérales peut poser un grave problème. La suspension résiliente du plafond sous le plancher (voir figure 6) ne réduit en aucune façon la transmission le long des murs vers les pièces adjacentes au même étage.

Une meilleure solution pour réduire la transmission des bruits d'impact par les voies latérales consiste à utiliser un plancher flottant, dont un modèle idéal est illustré à la figure 7. L'énergie sonore se dissipe dans la dalle flottante ou est considérablement réduite lorsque le son se propage de la dalle du plancher vers le reste de la structure, à travers la couche ou les supports résilients.

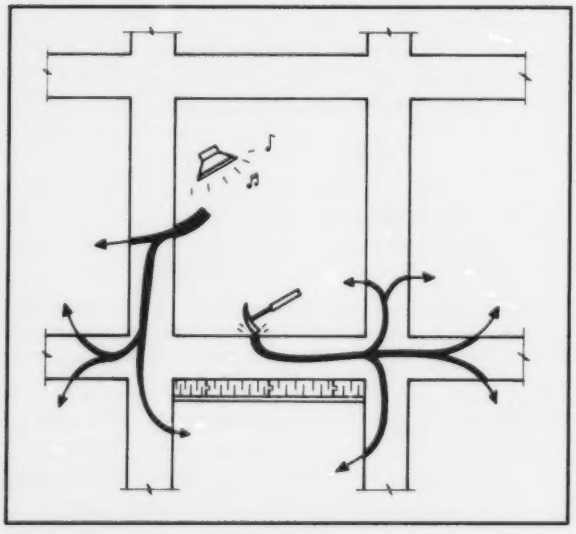

Figure 6

Voies de transmission latérales dans les plénums des édifices à bureaux

Un problème courant de transmission latérale du son dans les édifices à bureaux résulte de l'emploi d'un plafond suspendu continu et de cloisons qui ne s'étendent pas d'une dalle de plancher à l'autre. Ce type de construction crée une voie de transmission facile du son qui se propage entre les bureaux par le plafond et le plénum (figure 8). En général, les fuites dans le plafond et autour de la cloison constituent un passage facile pour le bruit; l'isolement acoustique entre les bureaux dépend habi-

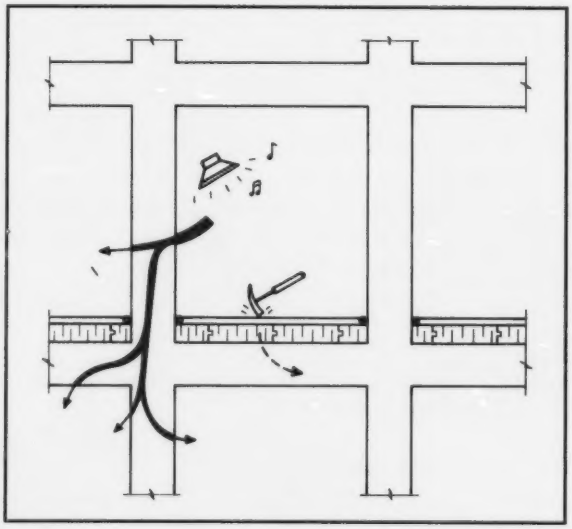

Figure 7

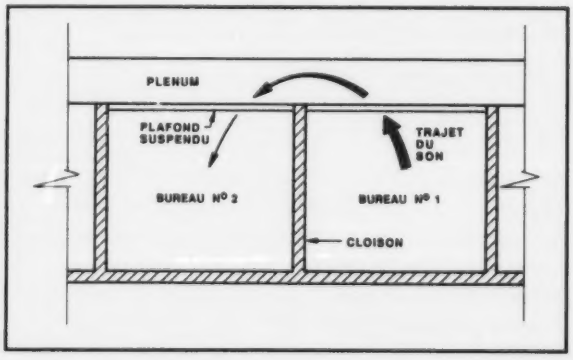

Figure 8

tuellement de ces fuites et des voies latérales, et non des cloisons.

Le son se propageant à travers le plénum doit être atténué au moyen de modifications apportées au plafond ou à l'espace situé au-dessus de la cloison. Le vide entre le haut du mur et la dalle du plafond peut être comblé avec un matériau qui se travaille facilement tel qu'un panneau de fibre, une plaque de plâtre, du contreplaqué ou peut-être du vinyle densifié. On pourrait tout simplement étendre la cloison jusqu'à la dalle, mais cette solution est souvent peu pratique. On a obtenu de bons résultats en remplissant l'espace au-dessus du mur avec des matelas de fibre de verre formant un bloc solide d'environ 1,2 m d'épaisseur. Il est toujours important de faire en sorte qu'il n'y ait pas de fuites résiduelles; la jonction plafond–mur est particulièrement critique. Les cavités continues telles que les conduits de chauffage, les chemins lumineux, les prises de courant dos à dos et les courtes sections de conduits droits non revêtus sont à éviter. Les modifications visant à améliorer l'intimité acoustique dans ces bureaux peuvent interférer avec la distribution de l'air et poser un nouveau problème. Cette possibilité ne doit pas être négligée.

Détails de construction

Les détails de construction à la jonction mur-plancher peuvent influer considérablement sur la transmission du son par les voies latérales. Dans la situation illustrée à la figure 9, le mur et le plancher avaient tous deux obtenu des valeurs STC élevées en laboratoire. Cependant, l'isolement acoustique entre appartements voisins est sérieusement réduit en raison de la transmission des vibrations le long de la surface supérieure du plancher. En effet, le son peut contourner le mur, étant transmis par la couche supérieure du plancher. La transmission des bruits d'impact le long du plancher jusque dans l'appartement adjacent est un problème particulièrement ennuyeux. Le remède consiste à introduire une discontinuité structurale (un coupe-vibrations) pour réduire le passage des vibrations le long de la couche légère, sans nuire à l'intégrité structurale de l'ensemble. Un tel coupe-vibrations est illustré à la figure 10, du côté droit, dans le cas d'un plancher flottant.

Des voies de transmission similaires existent avec les ensembles muraux; les principes restent les mêmes, c'est-à-dire qu'il faut introduire un type quelconque de coupe-vibrations.

La figure 11a illustre une coupe horizontale d'une jonction de murs où il y a un risque de transmission latérale le long du panneau mural. L'arrangement de la figure 11b, avec un panneau mural discontinu, convient mieux du point de vue acoustique. La construction illustrée à la figure 11a pourrait être choisie pour assurer une plus grande étanchéité à l'air sur un mur extérieur, mais dans ce cas, on peut procéder comme en 11c pour satisfaire à la fois les exigences acoustiques et les exigences relatives à l'étanchéité à l'air. Ainsi, un petit espace entre les panneaux muraux est calfeutré et recou-

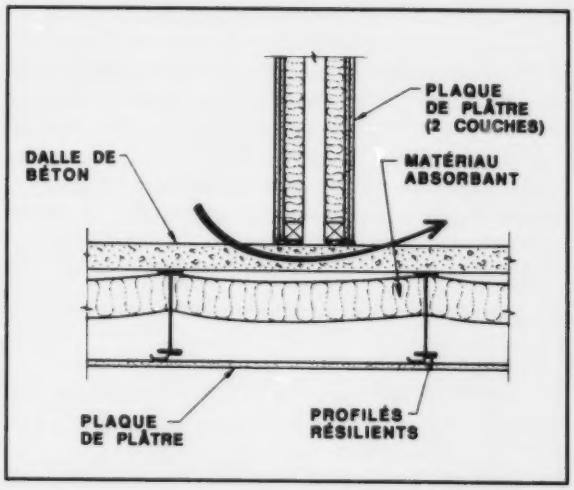

Figure 9

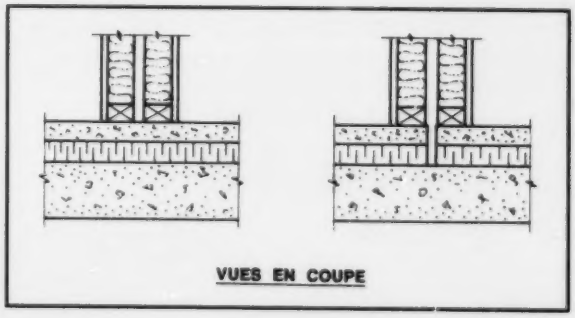

Figure 10

vert d'un ruban souple. Cette liaison résiliente est suffisante pour réduire la transmission des vibrations le long de la surface.

Il n'est pas toujours possible d'introduire une discontinuité structurale complète. Cependant, on peut compliquer le trajet suivi par le son en forçant ce dernier à changer plusieurs fois de direction; l'atténuation du son à travers la jonction est alors accrue. En gros, plus la jonction est compliquée, plus l'énergie sonore qui la traverse se trouve atténuée.

Lors de la conception d'un bâtiment, il n'est pas suffisant de choisir des éléments à perte de transmission élevée; il faut aussi examiner avec soin la façon dont ces éléments sont combinés en ensembles. Il n'existe encore pas de méthode sûre pour prévoir les effets des caractéristiques des liaisons sur la performance totale du bâtiment. Pour veiller à ce que les résultats souhaités soient atteints, il convient de mesurer la transmission du son entre des paires d'appartements dans un bâtiment avant de terminer les autres appartements. Ce mesurage peut être effectué rapidement et à peu de frais à l'aide d'une méthode telle que celle décrite dans la norme ASTM E597, "Standard practice for determining a single number rating of airborne sound isolation for use in multi-unit building specifications". Il n'est pas nécessaire d'attendre que la construction du bâtiment soit terminée et que les plaintes commencent à affluer; à ce moment-là, on peut seulement apporter les corrections dans le bâtiment suivant.

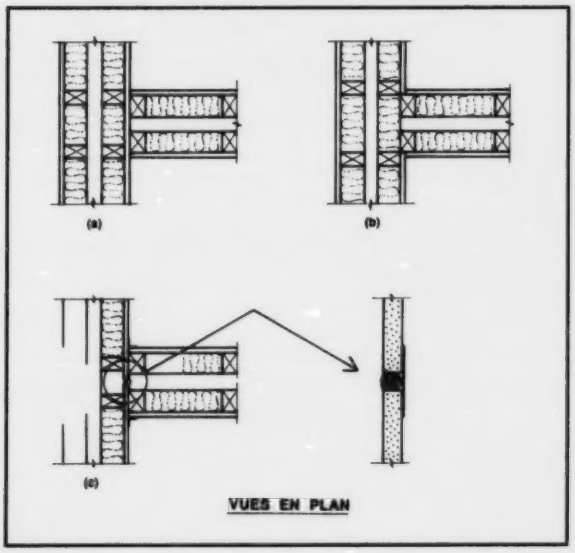

Figure 11

Fuites sonores

La fuite sonore est l'élément le plus faible que l'on peut avoir dans un système acoustique. La perte de transmission d'une fuite est approximativement nulle de sorte que, même petite, la fuite peut réduire considérablement l'efficacité d'un ensemble.

Il est extrêmement important d'éviter les fuites sonores. La figure 12 illustre les effets de trous de différentes tailles sur le STC d'un mur. Dans un mur ayant un STC potentiel de 55 ou 60, un trou de seulement 0,001 % de la surface totale réduit le STC réel à 50. Lorsque la surface du trou augmente, l'indice finit par dépendre entièrement de la surface du trou. Plus l'isolement acoustique doit être élevé, plus il importe d'éliminer toutes les fuites.

De petites fuites peuvent facilement se trouver à la périphérie des murs et des planchers, aux endroits où le calfeutrage est inexistant ou mal fait, ou encore lorsqu'un trou a été percé pour l'électricité ou la plomberie, par exemple. Pour réduire les fuites sonores, il faut calfeutrer soigneusement tous les trous et fissures dans un mur ou un plancher mitoyen, munir toutes les fenêtres et les

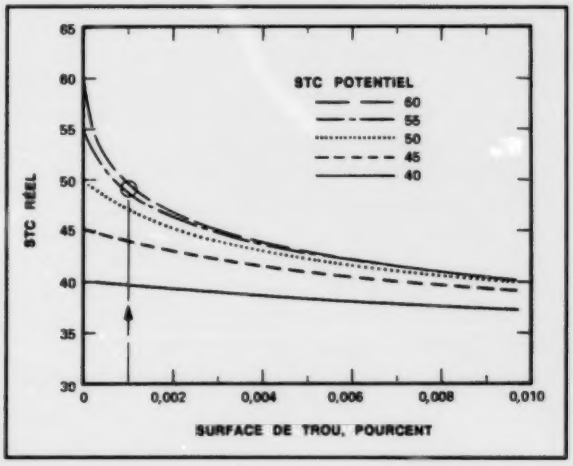

Figure 12

portes de coupe-bise étanches et réparer correctement tous les trous creusés pour les différents services utilitaires. En règle générale, si une construction n'est pas étanche à l'eau, il y a de grandes chances qu'elle ne soit pas "étanche au son".

Le graphique de la figure 12 est un graphique théorique. La figure 13 illustre un exemple pratique, à savoir l'effet de prises de courant électrique dos-à-dos, mal étanchées, sur le STC d'un mur. Lorsque le pourtour des prises de courant est bien étanché, le STC passe de 52 à 55. Dans ce cas, même si les trous sont assez grands, la présence de fibre de verre dans la cavité a permis de réduire la transmission par le trou. On a ainsi avantage à utiliser des matériaux absorbants dans les cavités murales : étant donné les pertes dans le matériau absorbant, la perte de transmission du trou n'est plus nulle. Néanmoins, si l'on doit installer des prises de courant électrique dans un mur mitoyen, il est préférable de les décaler le long du mur, sans oublier de les étancher correctement.

Bruits de plomberie

Les bruits de plomberie peuvent être considérés comme un cas particulier de bruits de machinerie. Trois facteurs interviennent dans les installations de plomberie : la pression de l'eau, la vitesse de l'eau ainsi que le nombre

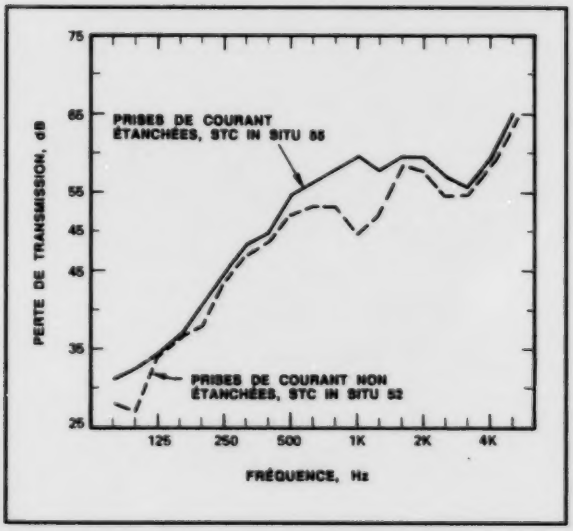

Figure 13

et les types d'étranglements et de raccords. La turbulence dans l'eau est une source de bruit hydrodynamique, et on peut la réduire en choisissant des accessoires bien conçus et en réduisant au minimum le nombre de raccords, de courbes brusques et d'étranglements dans l'installation. La pression statique de l'eau doit y être maintenue à moins de 0,25 MPa environ, au besoin à l'aide d'un régulateur de pression. Les débits de l'eau doivent être d'environ 2 m/s ou moins. On peut réduire le débit et le bruit en augmentant le diamètre des tuyaux, mais cette solution est moins efficace que la réduction de la pression dans le système.

Les bruits de plomberie sont presque toujours transmis dans la structure sous forme de vibrations qui finissent par rayonner des parois légères dans un grand nombre d'endroits différents. L'erreur la plus courante consiste à solidariser les conduites d'arrivée et d'évacuation de l'eau et autres dispositifs avec la structure. Pour que la quantité de vibrations sonores qui pénètrent dans la structure soit réduite, les tuyaux doivent être désolidarisés au moyen de manchons et de supports résilients ainsi que de connexions souples. Les figures 14a, b et c montrent la façon de procéder. Les trous percés dans les barrières acoustiques pour laisser passer les tuyaux doivent être étanchés soigneusement, tel qu'il est illustré. Il faut éviter à tout prix que les tuyaux touchent aux parois légères, car elles rayonnent facilement l'énergie sonore.

Le coup de bélier est provoqué par une fermeture rapide des soupapes. Il se produit alors dans le système une onde de choc qui fait vibrer les tuyaux. On peut réduire le

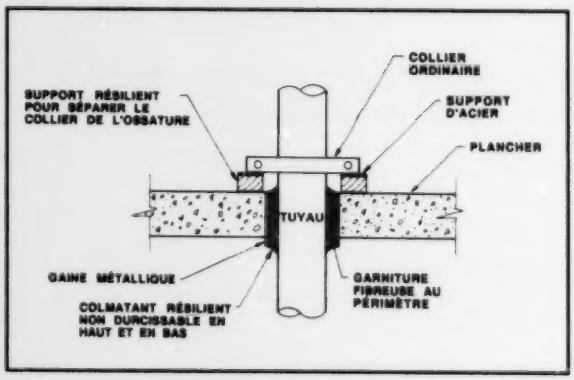

Figure 14a

coup de bélier en diminuant la pression et la vitesse ainsi qu'en évitant d'installer des soupapes qui se ferment rapidement. Des manchons remplis d'air et dont l'extrémité supérieure est fermée peuvent être insérés dans les tuyaux à proximité des appareils tels que les machines à laver; ils jouent le rôle de ressorts pour réduire les chocs (figure 15).

L'application pratique de toutes ces idées exige que l'on porte beaucoup de soin et d'attention aux détails. Deux plans complets, l'un pour une baignoire et l'autre pour une toilette, sont illustrés aux figures 16 et 17.

Comme dans le cas des autres sources de bruit, la disposition des pièces du bâtiment joue un rôle important dans l'élimination des bruits de plomberie. Lorsque c'est possible, les tuyaux ne doivent pas être installés dans les murs communs ou dans les plafonds et planchers adjacents à des pièces où le calme est important. Dans les situations critiques, les tuyaux doivent être enfermés dans des gaines suffisamment lourdes pour permettre une bonne réduction du bruit et doublés à l'intérieur de matériaux absorbants.

En Amérique du Nord, il n'y a actuellement aucune norme acoustique s'appliquant aux bruits de plomberie. En Europe, il existe des méthodes d'essai qui permettent

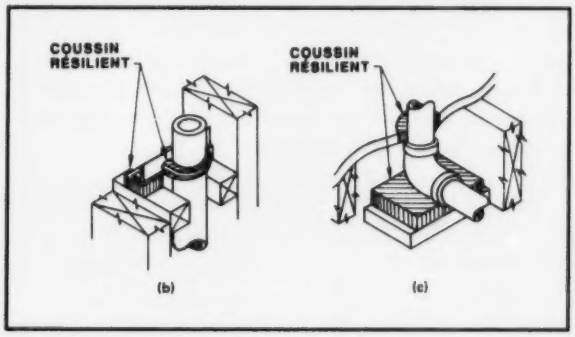

Figure 14b,c

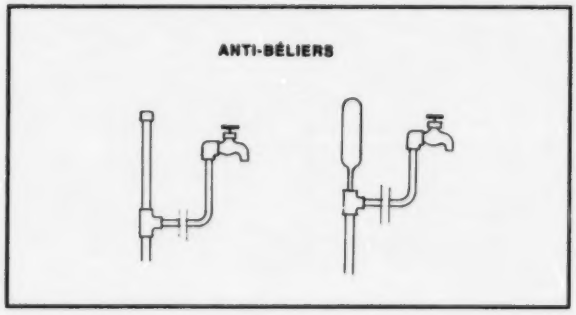

Figure 15

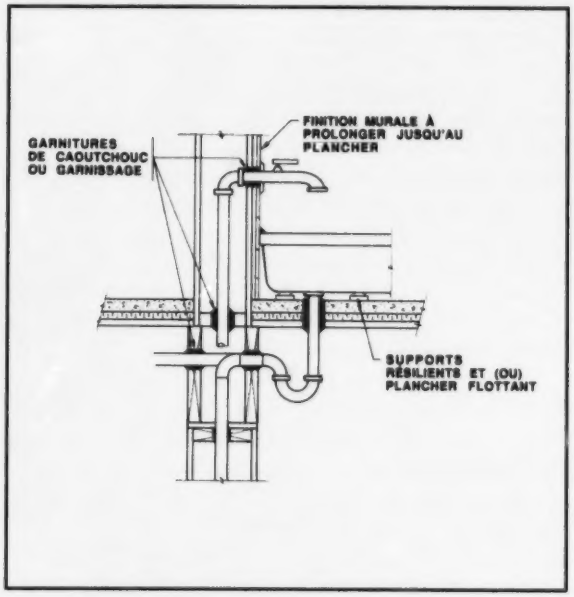

Figure 16

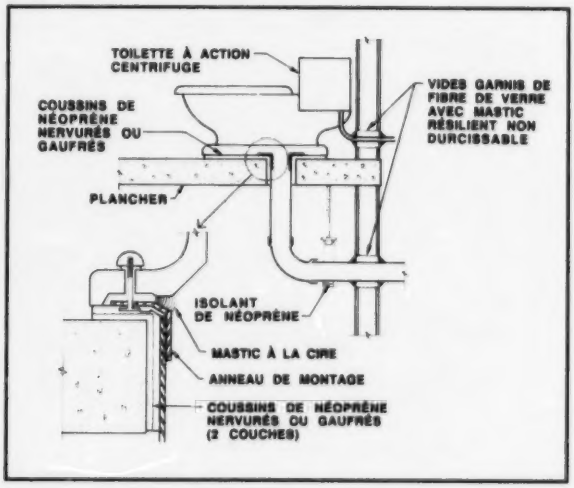

Figure 17

de déterminer le bruit produit par des éléments courants et qui facilitent le choix d'éléments pour les nouvelles constructions. L'état actuel des connaissances en acoustique ne permet pas de prévoir le niveau sonore dans une pièce lorsqu'une installation de plomberie particulière est combinée à différents types de murs et de planchers. Chacun doit donc se fier à son expérience et à son bon sens.

Résumé

La tâche à laquelle le concepteur d'un bâtiment fait face est la suivante : il doit d'abord établir les critères appropriés à un cas particulier, puis déterminer les éléments et le plan qui satisferont ces critères. Une fois les éléments choisis, le travail de conception n'est pas terminé : il faut encore examiner tous les détails des liaisons entre les éléments.

L'inspection sur le terrain au cours de la construction permet souvent de découvrir des erreurs qui peuvent être facilement corrigées à ce moment-là. Trop souvent, ces erreurs sont masquées et il est alors difficile de les découvrir ou de les corriger dans un bâtiment terminé. Des essais acoustiques dans un bâtiment partiellement terminé permettent d'éviter la répétition des erreurs et d'apporter les corrections nécessaires. Tout au long de ce travail, l'aide de professionnels simplifie la tâche du concepteur et constitue un atout pour la construction d'un bâtiment moins bruyant et plus agréable pour ses occupants.

Feuille de calcul

Première partie Calcul des STC des éléments à partir d'un STC nominal et des surfaces des éléments

STC nominal (STC') = ____

Élément	Pourcentage d'énergie %	C1	Pourcentage de surface %	C2	STC de l'élément = STC' - C1 + C2
1. ____	_____	____	_____	____	_____
2. ____	_____	____	_____	____	_____
3. ____	_____	____	_____	____	_____
4. ____	_____	____	_____	____	_____

Table de conversion des pourcentages en décibels; C = 10 log (Pourcent/100)
[Utiliser la colonne du centre pour convertir C en % et choisir la plage de % pour convertir des % en C]

Pourcentage	C	Pourcentage	C	Pourcentage	C
560 (630) 700	8	56 (63) 70	-2	5,6 (6,3) 7,0	-12
446 (500) 560	7	45 (50) 56	-3	4,5 (5,0) 5,6	-13
357 (400) 445	6	36 (40) 44	-4	3,6 (4,0) 4,5	-14
281 (315) 356	5	28 (32) 35	-5	2,8 (3,2) 3,6	-15
223 (250) 280	4	22 (25) 27	-6	2,2 (2,5) 2,8	-16
178 (200) 222	3	18 (20) 22	-7	1,8 (2,0) 2,2	-17
143 (160) 177	2	14 (16) 17	-8	1,4 (1,6) 1,8	-18
111 (125) 142	1	11 (12) 14	-9	1,1 (1,2) 1,4	-19
89 (100) 110	0	9 (10) 11	-10	0,9 (1,0) 1,1	-20
71 (80) 88	-1	7 (8) 9	-11	0,7 (0,8) 0,9	-21

Instructions

1) Répartir l'énergie parmi les éléments. Un bon point de départ consiste à supposer une énergie identique pour chaque élément.

2) Choisir les valeurs de C dans la table de conversion (utiliser la colonne du centre) et placer ces valeurs dans la colonne intitulée C1.

3) Inscrire les surfaces des éléments dans la colonne suivante.

4) Choisir les valeurs de C dans la table de conversion (utiliser la colonne du centre) et les inscrire dans la colonne intitulée C2.

5) Calculer la somme STC' - $C_1 + C_2$ à chaque ligne, en tenant compte des signes. Ces valeurs sont les indices STC requis pour chaque élément.

Les calculs peuvent être répétés avec de plus grandes fractions d'énergie traversant les éléments les plus faibles si le résultat n'est pas satisfaisant.

Feuille de calcul

Deuxième partie Calcul du STC total à partie de la surface et des STC des éléments.

STC de travail supposé (STC') = ____

Élément	STC	Pourcentage de surface %	C2	C1 = STC' - STC + C2	Pourcentage d'énergie %
1. ____	_____	_____	____	_____	_____
2. ____	_____	_____	____	_____	_____
3. ____	_____	_____	____	_____	_____
4. ____	_____	_____	____	_____	_____

Somme des pourcentages d'énergie = ____ → C' = ____

STC réel total = STC' - C' = ____

Instructions

1) Choisir une valeur de STC combiné (la moyenne arithmétique est pratique).

2) Inscrire les valeurs STC connues et les pourcentages de surface pour chaque élément dans la table.

3) Choisir la valeur de C correspondant aux surfaces dans la table de conversion. (Choisir la plage de valeurs dans laquelle se trouve la surface.)

4) Calculer les valeurs de C1 à chaque ligne.

5) Dans la table de conversion, choisir la valeur du pourcentage d'énergie correspondant à la valeur de C1 (utiliser la colonne des pourcentages au centre).

6) Ajouter les pourcentages d'énergie et trouver la valeur de C' dans la table de conversion.

7) La valeur réelle de STC pour le système est donnée par STC' - C', compte tenu des signes.

Questions et réponses

1. Est-ce que l'ajout d'un matériau absorbant sur la surface d'un mur ou d'un plancher accroît l'isolement acoustique de façon notable?

   L'ajout d'un matériau absorbant type sur la surface d'un mur peut changer la perte de transmission à fréquence élevée. C'est de cette façon que les matériaux absorbants courants sont le plus efficace. Cependant, l'indice de transmission du son (STC) ne change généralement pas, ou seulement de un à deux décibels, étant donné que la transmission des basses fréquences n'est pas modifiée par l'ajout de matériaux absorbants ordinaires sur les murs. On doit s'attendre, en posant un tapis sur un plancher, à ce que l'indice d'isolement aux bruits d'impact (IIC) augmente; mais l'indice STC restera habituellement le même. Beaucoup pensent qu'en ajoutant un matériau absorbant aux murs ou aux portes, ils amélioreront l'isolement acoustique entre les appartements. S'il y a suffisamment de matériau absorbant dans le local de réception, ce dernier sera moins réverbérant et les niveaux de bruit importun seront légèrement réduits; la réduction peut atteindre 3 dB si le degré d'absorption dans la pièce est doublé. La pièce paraîtra aussi acoustiquement "sourde", ce qui donne l'impression d'une certaine amélioration. Dans une pièce normalement "sourde" comme une chambre à coucher, il est très difficile de modifier la quantité d'absorption de façon notable car la pièce est déjà très absorbante. Des mesures précises ont montré que l'ajout d'un matériau absorbant ne remédie pas efficacement au problème.

2. Existe-t-il des données sur les coûts supplémentaires des mesures visant à assurer un bon isolement acoustique et à réduire les bruits de fond dans un bâtiment?

   La plupart des études de coût ont porté sur le coût additionnel des matériaux nécessaires pour améliorer les valeurs STC des murs. En général, le coût des matériaux supplémentaires nécessaires pour améliorer un type de mur particulier est relativement bas. Il serait peut-être seulement nécessaire d'ajouter quelques panneaux supplémentaires ou un matériau absorbant, ou encore d'utiliser une plus grande lame d'air.

   D'autres coûts, qui n'ont pas été étudiés, sont associés à l'inspection des dessins, aux inspections sur le terrain et au mesurage par un acousticien qualifié. Un ingénieur-conseil a estimé que ces coûts s'élevaient à environ 1000 $ par appartement, ce qui correspond à une petite fraction du coût total.

3. Que peut-on faire pour réduire la transmission acoustique par le plénum dans un édifice à bureaux?

   Dans les édifices à bureaux ordinaires, le son se propage à travers le matériau du plafond, à travers toute ouverture dans le plafond et pénètre dans le plénum. Il se propage ensuite librement dans le plénum pour redescendre par des chemins similaires dans les bureaux adjacents. Les panneaux de plafond courants offrent une atténuation acoustique limitée, surtout s'il y a des ouvertures pour la ventilation et autres installations. Pour améliorer la situation, il faut essayer d'atténuer le plus possible le son qui passe à travers le plafond ou qui pénètre dans le plénum. On obtient une amélioration notable en remplissant le vide au-dessus de la cloison avec des panneaux de blocage en plaque de plâtre ou en vinyle densifié, par exemple. Récemment, on a obtenu de bons résultats en remplissant le vide avec des matelas de fibre de verre d'environ 400 mm de largeur. Toutes les fuites doivent être réduites le plus possible, en particulier à la jonction cloison-plafond. Étant donné que le plénum est généralement utilisé pour la ventilation, toutes les conduites d'air susceptibles d'accroître la transmission acoustique doivent être traitées de façon à fournir une atténuation acoustique adéquate, en utilisant par exemple des conduites doublées.

4. Si les portes des appartements sont mieux isolées, comme vous le suggérez, cela ne signifie-t-il pas que les alarmes d'incendie seront moins audibles?

   Oui, si les alarmes sont dans le corridor. Cependant, même dans les appartements où les portes ne sont pas particulièrement étanches, les alarmes d'incendie peuvent ne pas être audibles s'il y a trop de portes entre l'alarme et les occupants. Il est préférable de poser les alarmes d'incendie à l'intérieur des appartements, avec des connexions

électriques de façon que toutes les alarmes soient déclenchées par une seule. Lorsqu'on choisit l'emplacement des alarmes d'incendie dans une maison ou un appartement, il faut connaître la puissance acoustique du dispositif de façon à pouvoir prévoir raisonnablement son efficacité.

5. Comment mesure-t-on la perte de transmission dans un bâtiment?

   On utilise un haut-parleur et un amplificateur pour produire un grand bruit quelconque dans une pièce située d'un côté de la cloison mise à l'essai. On mesure le niveau de pression acoustique moyen dans le local d'émission et dans le local de réception pour au moins 16 fréquences, depuis 125 Hz jusqu'à 4000 Hz. La différence entre ces deux ensembles de valeurs est appelée l'affaiblissement acoustique. Plus la surface de la cloison séparant les deux pièces est grande, plus la quantité d'énergie sonore traversant la cloison est grande. Plus le local de réception est absorbant, plus le niveau de pression acoustique dans cette pièce est faible. Les valeurs d'affaiblissement acoustique sont donc corrigées en fonction de ces deux facteurs, pour donner la perte de transmission (TL) : c'est la mesure de la puissance acoustique transmise par unité de surface. La perte de transmission est indépendante de la surface de la cloison et des propriétés de la pièce réceptrice. Les pertes de transmission sont utilisées pour calculer l'indice STC.

   La norme ASTM E597 décrit une méthode plus rapide qui donne un nombre très proche de l'indice de transmission du son in situ (FSTC). Cette méthode permet de mettre à l'essai rapidement et facilement plusieurs murs et planchers mitoyens d'un appartement, ou tous, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer l'essai complet. Les indices obtenus avec la méthode E597 diffèrent en général de moins de 2 dB environ de l'indice FSTC de la cloison.

6. Quelle est la différence entre l'indice d'isolement au bruit et l'indice de transmission du son sur le terrain?

   Si l'on traite les valeurs d'affaiblissement acoustique comme des valeurs de perte de transmission et que l'on ajuste la courbe de perte de transmission de la façon habituelle, on obtient un nombre appelé l'indice d'isolement au bruit. Aucune correction n'est apportée en fonction de la surface de la cloison ou de l'absorption de la pièce et aucune mesure n'est prise pour éliminer les voies de transmission latérales. L'indice d'isolement au bruit caractérise donc la transmission du son entre deux pièces, et tient compte de toutes les voies de transmission latérales et des conditions physiques au moment du mesurage.

7. Quelle relation existe-t-il entre l'indice de transmission du son in situ et la valeur mesurée en laboratoire?

   Ce problème soulève une certaine controverse. Si les voies de transmission latérales sont suffisamment importantes dans un bâtiment, l'indice de transmission du son apparent est plus faible. On peut s'attendre à une diminution jusqu'à 5 dB des indices sur le terrain par rapport aux indices obtenus en laboratoire, mais, avec de bonnes méthodes de construction, on peut obtenir des valeurs presque aussi élevées qu'en laboratoire.

8. Si l'isolement acoustique était mesuré pour un grand nombre de cloisons dans un appartement, observerait-on des variations importantes des indices FSTC?

   C'est un domaine où nos connaissances sont insuffisantes. Une certaine variation est associée à la méthode d'essai elle-même, et cette variation est faible par rapport à la variation associée au bâtiment. Cela dépend du soin apporté à la construction des cloisons et des planchers afin qu'ils soient identiques et bien construits, ainsi qu'aux mesures prises pour éviter la transmission latérale. Cependant, si un essai sur le terrain révèle que l'indice de transmission du son est inférieur de 5 dB à la valeur prévue, il y a un problème quelque part.

9. Est-ce que les tuyaux en plastique augmentent ou réduisent les bruits de plomberie?

   Le type de tuyaux utilisés dans les installations de plomberie n'est pas le principal facteur déterminant

les bruits produits dans un bâtiment. Il existe des différences entre les différents matériaux et, en général, plus le tuyau est lourd, moins la quantité d'énergie sonore rayonnée est grande. Le bruit rayonné par les tuyaux est habituellement négligeable par rapport au bruit rayonné par les cloisons et la structure. Il est beaucoup plus important de vérifier que tous les supports résilients dans l'installation de plomberie sont correctement posés et que les appareils utilisés ne sont pas bruyants.

10. Quels types de matériaux résilients sont utilisés sous les planchers flottants?

    Un plancher flottant est conçu pour avoir une résonance de base bien en dessous des fréquences considérées, de façon qu'aux fréquences supérieures à cette résonance la transmission des vibrations soit réduite considérablement. La masse de la couche flottante et la rigidité des supports résilients déterminent cette fréquence de résonance. Divers matériaux sont utilisés comme supports résilients : coussins de caoutchouc ou de néoprène, coussins de liège, certains matériaux composés tels que le mélange fibre de verre–néoprène et, dans certaines applications difficiles, des ressorts d'acier. Dans certains cas, tout le sous-plancher est recouvert de laine minérale qui sert à la fois de matériau absorbant et de support résilient.

11. Peut-on utiliser des panneaux absorbants suspendus pour éliminer la réverbération dans des salles telles qu'un gymnase d'école, et comment doit-on concevoir et installer ces panneaux pour obtenir un effet maximal?

    Les panneaux absorbants suspendus ou les éléments absorbants constituent un moyen pratique et efficace d'éliminer la réverbération dans des salles telles que les locaux industriels et les gymnases d'école. Bien que des éléments absorbants de diverses formes fabriqués en usine soient disponibles sur le marché, il est possible de construire des éléments à partir de panneaux absorbants rigides ordinaires de 0,61 sur 1,22 m (2 pi sur 4 pi) tels que ceux utilisés dans certains plafonds suspendus. En plaçant deux de ces panneaux de 2,5 cm dos à dos dans un cadre approprié, on obtient un élément absorbant dont l'absorption est plus du double de celle que l'on obtiendrait avec des panneaux plus grands de même épaisseur totale (5 cm) placés contre une paroi rigide. Cela est dû à la petite dimension du panneau et au fait que les deux côtés sont exposés au champ sonore. On peut améliorer la performance à basse fréquence de l'élément en laissant une lame d'air entre les deux couches absorbantes ou en utilisant des couches de matériau absorbant plus épaisses.

    Il est généralement plus efficace de suspendre les panneaux verticalement de façon que les deux côtés du panneau soient complètement exposés au champ sonore. Les panneaux doivent être répartis régulièrement dans toute la salle. Lorsque les panneaux sont suspendus horizontalement, il y a diminution de l'absorption aux fréquences moyennes et supérieures si le panneau est rapproché du plafond. Les panneaux horizontaux produisent une augmentation de l'absorption sur des plages étroites de basses fréquences particulières, mais cette augmentation est faible et est associée à une perte d'absorption aux fréquences moyennes et élevées. Lorsque les panneaux sont trop rapprochés, ils ont tendance à se faire de l'ombre et l'absorption par panneau diminue. D'après les résultats d'une série d'essais avec des panneaux de 0,61 m sur 1,22 m, cet effet devient important lorsqu'il y a plus d'un panneau par trois mètres carrés de plafond. Bien entendu, si l'on ajoute plus de panneaux, il y aura toujours un accroissement de l'absorption acoustique totale, mais l'absorption moyenne par panneau pourrait diminuer.

12. L'utilisation d'un tapis sur les murs comme matériau absorbant résistant serait-elle acoustiquement efficace?

    Cette solution n'est probablement pas la plus rentable et, dans certains cas, elle peut contrevenir aux règlements contre les incendies. En général, les tapis constituent de bons absorbants acoustiques aux hautes fréquences seulement; ils ne sont pas très efficaces aux basses fréquences en raison de leur faible épaisseur. Les matériaux absorbants poreux doivent avoir une épaisseur voisine de 1/4 de la longueur d'onde pour constituer des absorbants

optimaux. Une fréquence de 100 Hz, caractéristique de nombreux sons d'accompagnement en musique, correspond à une longueur d'onde de 3,4 m. Il est donc pratiquement impossible d'avoir un matériau absorbant poreux optimal à cette fréquence. Cependant, à des fréquences plus élevées, où la longueur d'onde est plus courte, les fines couches poreuses comme les tapis constituent des absorbants plus efficaces. L'absorption réelle à fréquence moyenne des tapis peut varier considérablement. Lorsque le tapis est poreux à l'air, les tapis plus épais et plus denses ont tendance à être de meilleurs absorbants. Dans certains cas, les tapis ayant un envers en caoutchouc ou un envers étanche sur un sous-tapis de mousse peuvent avoir une plus grande absorption à fréquence moyenne à cause des effets de membrane.

D'autres matériaux absorbants peuvent être protégés par un revêtement de tasseaux de bois, de métal perforé, de métal déployé ou autres constructions similaires. Il faut laisser au moins 50 % du matériau absorbant poreux exposé au son pour ne pas nuire à son efficacité. Lorsque le pourcentage de surface exposée est bien inférieur à 50 %, il peut se produire des effets de cavité accordée résonante; l'absorption est plus grande à des fréquences particulières tandis que l'absorption globale diminue.

13. Comment choisir un silencieux?

Il faut considérer trois facteurs : la perte par insertion ou atténuation acoustique, le bruit propre au silencieux ou bruit d'écoulement produit par le silencieux et la chute de pression statique induite par le silencieux. Lorsqu'on a trouvé un silencieux avec une chute de pression statique appropriée, la perte par insertion en décibels doit être suffisamment grande pour que les niveaux sonores du ventilateur soient inférieurs aux critères spécifiés pour les locaux desservis par le ventilateur. La perte par insertion du silencieux est généralement spécifiée par plage de fréquences en bande d'octave. En général, les silencieux sont beaucoup moins efficaces aux basses fréquences et une performance adéquate dans cette gamme de fréquences est particulièrement importante. Il convient d'obtenir les valeurs des pertes par insertion fournies par le fabricant, qui sont mesurées à environ la même vitesse d'écoulement que celle prévue dans l'installation car la perte par insertion tend à diminuer avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air.

Il est aussi important de vérifier que le bruit propre au silencieux n'est pas beaucoup plus fort que le bruit atténué du ventilateur. Le bruit propre varie considérablement avec la vitesse d'écoulement de l'air et il est donc nécessaire de connaître le bruit produit à la vitesse prévue pour l'installation. Si le bruit propre est plus fort que le bruit atténué du ventilateur, le silencieux choisi n'est pas optimal. Il faut choisir un autre silencieux avec une perte par insertion un peu plus faible et un bruit propre moins fort. Par exemple, de nombreux silencieux sont dotés de répartiteurs (structures absorbantes placées au milieu du silencieux); toutefois, ces dispositifs ont tendance à accroître non seulement la perte par insertion mais aussi le bruit propre et la chute de pression statique du silencieux. Par conséquent, quand une perte par insertion maximale n'est pas une condition nécessaire, il existe plusieurs façons d'optimiser l'efficacité du silencieux.

14. Est-ce que le fait de peindre les tuiles d'un plafond réduit l'absorption acoustique?

Les tuiles de plafond absorbent le son car elles sont poreuses au mouvement de l'air associé au son. En peignant une tuile de plafond, on peut étancher complètement la surface et réduire considérablement sa capacité d'absorption. Il peut être possible d'ajouter une très fine couche de peinture au latex à capacité de pontage nulle sans trop nuire à l'absorption des tuiles. Les tuiles à texture grossière sont moins affectées par une telle couche de peinture car il y a moins de risque que la surface soit étanchée. La méthode d'application a aussi son importance. La pulvérisation permet à la peinture de s'introduire dans les pores des tuiles et les coups de pinceau vigoureux pourraient avoir le même effet. Une application légère au rouleau devrait donner les meilleurs résultats.

15. L'acoustique des auditoriums semble plus relever de l'art, ou peut-être de la magie, que de la science. Existe-t-il de nouvelles méthodes, plus scientifiques, pour évaluer les problèmes acoustiques des auditoriums?

    Le problème de l'acoustique des auditoriums dépasse un peu le champ de ces séminaires, mais il y a certainement eu des progrès considérables dans ce domaine. Le temps de réverbération n'est plus la seule mesure objective pour l'évaluation de ce type de salle. Un certain nombre de mesures acoustiques plus récentes sont liées à l'évaluation subjective. Le CNRC a mis au point des méthodes efficaces de mesure de ces quantités et a aidé des clients à évaluer divers auditoriums.

16. Est-ce que l'espacement des poteaux dans un mur influe sur l'indice de transmision du son (STC)?

    Théoriquement, le STC devrait être légèrement inférieur lorsqu'on réduit l'espace entre les poteaux ou entre les clous ou les vis qui fixent les plaques de plâtre aux poteaux. Ces effets ont fait l'objet de quelques essais en laboratoire seulement et on ne peut en tirer des conclusions claires. Pour un espacement ordinaire des montants et des attaches, il est peu probable que la variation du STC atteigne 2 dB.

17. Est-ce que tous les profilés résilients et tous les poteaux d'acier légers sont identiques?

    La quantité d'énergie vibratoire transmise par les profilés résilients ou les poteaux d'acier dépend de leur rigidité. Cette rigidité ne dépend pas seulement du matériau (normalement, une tôle de calibre 24), mais aussi de la façon dont ils sont fabriqués. Il n'existe pas de résultats d'essais indépendants permettant de comparer l'efficacité de divers produits.

18. Existe-t-il une différence importante entre les solives de plancher en bois massif, les fermes de bois ou en métal? Est-il préférable d'utiliser des solives décalées pour soutenir le plafond dans un ensemble de plancher–plafond?

    Du point de vue acoustique, il y a peu de différence entre les différents types courants de solives. Elles doivent être assez rigides pour soutenir le plancher et, par conséquent, elles transmettent bien les vibrations du plancher au plafond situé en-dessous (ou vice versa). L'emploi de profilés résilients pour soutenir le plafond réduit ce problème, et le résultat est encore meilleur lorsqu'on utilise des solives décalées. En réalité, on ne gagne pas beaucoup à éliminer cette voie de transmission des vibrations car il y a aussi transfert de vibrations entre le plancher et les murs porteurs.

19. Quelle quantité maximale de matériau isolant peut-on poser dans un mur ou un plancher? Est-ce que l'ajustement de l'isolant dans la cavité et la densité ou le coefficient d'absorption du matériau isolant sont importants?

    Normalement, le STC est meilleur lorsque la cavité est pratiquement pleine, mais le fait de remplir la cavité aux deux-tiers ou complètement ne devrait pas faire varier le STC des cloisons ordinaires de plus de 1 décibel. Le matériau absorbant ne doit pas être tassé dans la cavité car il pourrait alors constituer une voie supplémentaire de transmission des vibrations. Il convient d'utiliser un matériau poreux, acoustiquement absorbant, mais les résultats d'essais obtenus à ce jour ne permettent pas d'établir clairement une forte relation entre la perte de transmission et le coefficient d'absorption ou la densité.

20. Existe-t-il une façon idéale de fixer ensemble plusieurs épaisseurs de panneaux muraux? La colle est-elle meilleure que les vis? Y a-t-il des avantages à utiliser une construction asymétrique (par exemple, plus de panneaux d'un côté que de l'autre) dans les murs ou les planchers?

    Les parois multiples doivent être fixées les unes aux autres de façon que les lames d'air résultantes soient aussi minces que possible (de préférence très inférieures à 1 mm) afin d'éviter les problèmes de résonance masse–air–masse. Apparemment, l'utilisation de vis ou de colle par points importe peu et, avec ces méthodes de fixation, la distribution des couches de panneaux muraux entre les deux faces a

peu d'effet sur la transmission acoustique. L'emploi de parois ayant des fréquences de coïncidence différentes présente un léger avantage, mais ce dernier se fait généralement sentir aux fréquences élevées seulement et le STC peut rester le même. On peut obtenir des fréquences de coïncidence différentes en utilisant des plaques de plâtre de deux épaisseurs notablement différentes (par exemple, 13 mm et 25 mm) ou en fixant les parois d'un côté de la cloison avec des vis très espacées ou des traces de colle, et de l'autre côté avec de la colle étalée sur toute la surface.

21. Si j'ai le choix entre doubler la lame d'air dans un mur à cavité ou doubler le nombre de parois de chaque côté, quelle solution dois-je adopter? Existe-t-il une limite supérieure pratique à la lame d'air d'un mur à cavité?

    Les avantages relatifs du doublement de la lame d'air ou de la masse surfacique dépendent des caractéristiques particulières de la construction. Certains effets acoustiques dépendent de la masse seulement, d'autres de l'espacement, et d'autres des deux facteurs. Pour un espacement moyen (de 25 à 100 mm), il revient au même de doubler l'un ou l'autre facteur, mais, pour un espacement très grand ou très petit, on ne gagne rien à doubler l'épaisseur de la lame d'air. Il y a un certain avantage à augmenter l'épaisseur des grandes lames d'air (au-dessus de 150 mm), mais il est plus efficace d'augmenter la masse.

22. Le fait de fixer une plaque de plâtre sur la face interne des poteaux d'un mur à double ossature réduit le STC; y a-t-il un inconvénient à utiliser un panneau de fibre de verre ou de fibre de bois rigide ou encore à simplement appuyer les plaques de plâtre entre les deux rangées de poteaux, avec des vides?

    Du point de vue acoustique, ce n'est pas une bonne idée de placer des parois solides, comme des plaques de plâtre ou des panneaux de fibre de verre, au centre d'un mur ou d'un plancher à cavité. Si la fibre de verre est assez poreuse, elle ne crée pas de résonance indésirable, mais il n'y a aucun avantage acoustique à utiliser ce type de matériau de préférence aux matelas. Il est possible que des plaques de plâtre ou des panneaux de fibre de bois simplement placés entre deux rangées de poteaux ne réduisent pas la perte de transmission autant que lorsque le matériau est fixé de façon rigide, mais la perte de transmission de l'ensemble s'en trouve peu améliorée; il est plus efficace d'utiliser ce matériau sur la surface extérieure de la cloison.

23. Dans des climats relativement chauds, comme à Vancouver, il est difficile de justifier sur le plan économique l'emploi d'un double vitrage dans le but de réaliser des économies d'énergie. Est-il possible d'obtenir un bon isolement acoustique sans double vitrage?

    Un vitrage simple étanche donne de bons indices STC d'environ 30 à 35, suivant l'épaisseur du verre et d'autres caractéristiques. Avec un verre feuilleté, le STC est quelque peu supérieur, mais il faut un verre assez épais pour dépasser un STC de 40. Qu'il soit plus économique d'utiliser un double vitrage ou un verre feuilleté dépend des prix locaux et de l'isolement acoustique requis.

24. Lorsqu'on utilise un verre feuilleté, est-il préférable de prendre deux couches de 6 mm ou quatre couches de 3 mm?

    L'avantage du verre feuilleté est principalement dû aux pertes d'énergie dans les couches qui lient le verre. L'amélioration de la perte de transmission dépend non seulement du nombre de couches, mais aussi de leurs caractéristiques. Avec des couches intermédiaires appropriées, le nombre de couches n'est pas important.

25. Lorsqu'il s'agit de fenêtres à double vitrage, quels avantages y a-t-il à utiliser deux épaisseurs différentes de verre ou à incliner le verre d'un côté de façon que la lame d'air ne soit pas uniforme?

L'inclinaison du verre n'a pratiquement pas d'effet sur la transmission du son à travers la fenêtre (bien que cela puisse être utile pour éviter des problèmes de réflexion optique). L'emploi de deux épaisseurs de verre différentes améliore légèrement le STC. Ce problème est examiné dans un document de J.D. Quirt, Transmission du son par les fenêtres , CBD 240F, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, 1986.

Ingénieurs-conseils participants

Mr. Don Allen
Vibron Limited
1720 Meyerside Drive
Mississauga, Ontario
L5T 1A3 (416) 677–4922

Mr. Balachandran
Western Research and Development Ltd.
Subsidiary of Bow Valley Industries Ltd.
#3, 1313 44th Avenue N.E.
Calgary, Alberta
T2E 6L5 (403) 276–8806

Mr. Mohan Barman
Barman Coulter Swallow Associates
1 Greensboro Drive, #401
Rexdale, Ontario
M9W 1C8 (416) 245–7501

Mr. Ken Barron
Barron and Associates
3284 Heather Street
Vancouver, B.C.
V5Z 3K5 (604) 872–2508

Mr. William Bradley
Acoustical Engineer
William Bradley and Associates
3600, Ridgewood
Montreal, Quebec
H3V 1C2 (514) 735–3846

Mr. Bob Cyr
Atlantic Acoustical Associates
P.O. Box 2520, DEPS
Dartmouth, N.S.
B2W 4A5 (902) 425–0044

Mr. Les Franks
Harford Kennedy Lyzun Acoustical Consultants
3680 East Hastings St., Suite 103
Vancouver, B.C.
V5K 2A9 (604) 291–9991

Monsieur Gislain l'Heureux
G.L.'H
911 Rang Saint-Antoine
Saint-Férréol-les-Neiges (Québec)
G0A 3R0 (418) 826–2589

Mr. Jim Kelseau
Hatch Associates Ltd.
21 St. Clair Avenue West
Toronto, Ontario
M4T 1L9 (416) 962–6350

Mr. Doug Kennedy
Harford Kennedy Lyzun Acoustical Consultants
3680 East Hastings St., Suite 103
Vancouver, B.C.
V5K 2A9 (604) 291–9991

Mr. Grant Klassen
Klassen Electro-Acoustics
P.O. Box 2083
Winnipeg, Man.
R3C 3R4 (204) 774–3077

Mr. Dan Lyzun
Harford Kennedy Lyzun Acoustical Consultants
3680 East Hasting St., Suite 103
Vancouver, B.C.
V5K 2A9 (604) 291–9991

Monsieur Michel Morin, arch.
6555 Côte des Neiges
Bureau #440
Montréal (Québec)
H3S 2A6 (514) 737–9811

Mr. Donald Olynyk
David Olynyk
#210, 8403 87th Street
Edmonton, Alberta
T6C 3G8 (403) 465–4125

Mr. Tom Paige
Paige Engineering Company
19 Trafford Park
St. Vital, Winnipeg, Man.
R2M 4Z7 (204) 257–6485

Monsieur James Rennie
SNC Inc.
Division de l'environnement
1, Complexe Desjardins
Montréal (Québec)
H5B 1C8 (514) 282–9551

Mr. Leslie T. Russell
Dept. of Mechanical Engineering
Technical University of Nova Scotia
Box 1000
Halifax, N.S.
B3J 2X4 (902) 429–8300

Mr. John Swallow
Barman Coulter Swallow Associates
1 Greensboro Drive, #401
Rexdale, Ontario
M9W 1C8 (416) 245–7501

Mr. Peter Terroux
Atlantic Acoustical Associates
P.O. Box 2520, DEPS
Dartmouth, N.S.
B2W 4A5 (902) 425–0044

Mr. Doug Whicker
Whicker Associates
1102 Heywood Avenue
North Vancouver, B.C.
V7L 1H4 (604) 987–2655